

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matija Vindiš**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Matija Vindiš

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru na iznimnoj pomoći tokom izrade ovog rada, svim zaposlenicima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, naročito asistentu Matiji Sakomanu mag. ing. mech., te svojoj obitelji.

Matija Vindiš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matija Vindiš**

Mat. br.: 0035174252

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Rekonstrukcija referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Reconstruction of a reference force standard with the nominal capacity  
of 1000 N**

Opis zadatka:

Mjerenje sile je osnova za određivanje mehaničkih svojstava materijala, a sljedivost rezultata mjerenja sile se osigurava neprekinutim lancem usporedbi preko referentnih etalona sve do primarnog etalona sile. Konstrukcijsko rješenje ima uvelike utjecaja na mjernu sposobnost etalona sile.

U radu je potrebno sljedeće:

1. Opisati vrste etalona sile i iz literaturnih izvora dati njihove mjerne sposobnosti.
2. Rekonstrukcija prihvatnog sustava referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N.
3. Eksperimentalno, usporednim mjerenjima, odrediti mjernu sposobnost referentnog etalona sile nakon provedene rekonstrukcije.
4. Obrada i analiza rezultata.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

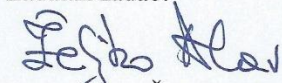
Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.


Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MJERENJE SILE .....	3
2.1. Sila kao fizikalna veličina .....	3
2.2. Osnove mjerenja .....	4
2.3. Karakteristike sustava za mjerenje sile .....	5
2.4. Slijedivost, etaloni i umjeravanje etalona sile.....	7
2.4.1. Etaloni sile .....	9
2.4.2. Umjeravanje etalona sile .....	12
3. POSTUPAK UMJERAVANJA ETALONA SILE SUKLADNO NORMI HRN EN ISO 376 [8].....	15
3.1. Preliminarna mjerenja .....	15
3.1.1. Test preopterećenja .....	15
3.1.2. Provjera vezana uz primjenu sile .....	15
3.1.3. Promjenjivi naponski test.....	17
3.1.4. Postavljanje prijenosnog etalona sile u referentni etalon.....	17
3.1.5. Određivanje rezolucije uređaja za očitavanje .....	19
3.1.6. Analogna skala.....	19
3.1.7. Digitalna skala .....	19
3.2. Umjeravanje .....	20
3.3. Obrada rezultata i klasifikacija prijenosnog etalona sile.....	22
3.3.1. Izračun relativnih pogrešaka .....	24
3.3.1.1. Relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti, $b$ i $b'$ .....	24
3.3.1.2. Relativna pogreška interpolacije, $f_c$ .....	24
3.3.1.3. Relativna pogreška nule, $f_0$ .....	24
3.3.1.4. Relativna pogreška histereze, $v$ .....	24
3.3.1.5. Relativna pogreška puzanja, $c$ .....	25
3.4. Opis procjene i proračuna mjerne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile.....	26
3.4.1. Općenito .....	26
3.4.2. Relativne standardne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile .....	26
3.4.2.1. Relativna standardna mjerna nesigurnost primijenjene sile, $w_1$ .....	26
3.4.2.2. Relativna standardna mjerna nesigurnost obnovljivosti, $w_2$ .....	27
3.4.2.3. Relativna standardna mjerna nesigurnost ponovljivosti, $w_3$ .....	27
3.4.2.4. Relativna standardna mjerna nesigurnost rezolucije, $w_4$ .....	27
3.4.2.5. Relativna standardna mjerna nesigurnost puzanja, $w_5$ .....	27
3.4.2.6. Relativna standardna mjerna nesigurnost nule, $w_6$ .....	28
3.4.2.7. Relativna standardna mjerna nesigurnost temperature, $w_7$ .....	28

3.4.2.8.	Relativna standardna mjerna nesigurnost interpolacije, $w_8$ .....	28
3.4.2.9.	Sastavljena relativna standardna nesigurnost $w_c$ i proširena mjerna nesigurnost umjeravanja prijenosnih etalona sile, $W$ .....	29
3.4.2.10.	Utjecaj histereze na nesigurnost prijenosnog etalona sile.....	29
4.	IDEJNO RJEŠENJE PRIHVATA ZA UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE DO 1 kN .....	30
4.1.	Konstrukcija okvira nosača utega .....	30
4.2.	Analiza rješenja okvira za utege sila.....	31
4.3.	Usporedba mogućih rješenja okvira nosača utega sile.....	37
5.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	39
5.1.	Umjeravanje okvira nosača sa tri kraka i utega etalona sile 1 kN .....	39
5.2.	Umjeravanje u Tübitak umjernom laboratoriju .....	41
5.2.1.	Rezultati umeravanja prijenosnog etalona sile Z30A 200 N .....	42
5.2.2.	Reultati umeravanja prijenosnog etalona sile U1 500 N.....	45
5.3.	Umjeravanje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava .....	48
5.3.1.	Reultati umeravanja prijenosnog etalona sile Z30A 200 N .....	48
5.3.2.	Reultati umeravanja prijenosnog etalona sile U1 500 N.....	51
6.	ANALIZA REZULTATA .....	54
7.	ZAKLJUČAK.....	60
	LITERATURA.....	61
	PRILOZI.....	62

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Mjerno pojačalo [4] .....	5
Slika 2.	Shematski prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [1] .....	6
Slika 3.	Piramida sljedivosti mjerenja sile [4] .....	8
Slika 4.	Primarni etalon sile 1 MN, PTB, Njemačka [6] .....	10
Slika 5.	Načini realizacije sile kod referentnih etalona [4] .....	11
Slika 6.	Referentni etalon HMI/FSB-LIMS [7] .....	12
Slika 7.	Prijenosni etalon sile [4] .....	12
Slika 8.	Prihvatne naprave za vlak [8] .....	18
Slika 9.	Tlačne ploče [8] .....	18
Slika 10.	Pozicije dinamometra pri umjeravanju [8] .....	21
Slika 11.	Vanjske dimenzije dinamometra .....	30
Slika 12.	Dimenzije okvira nosača utega sile .....	31
Slika 13.	Pojednostavljeni model okvira nosača utega sa dva kraka .....	32
Slika 14.	Primijenjeni rubni uvjeti .....	32
Slika 15.	Mreža konačnih elemenata .....	33
Slika 16.	Pomaci u modelu sa dva kraka .....	34
Slika 17.	Vrijednosti naprezanja u modelu sa dva kraka .....	34
Slika 18.	Pomaci u donjoj ploči modela sa dva kraka .....	35
Slika 19.	Pomaci u gornjoj ploči modela sa dva kraka .....	35
Slika 20.	Ukupni pomaci modela sa tri kraka .....	36
Slika 21.	Raspored naprezanja modela sa tri kraka .....	36
Slika 22.	Pomaci u donjoj ploči modela sa tri kraka .....	36
Slika 23.	Pomaci u gornjoj ploči modela sa tri kraka .....	37
Slika 24.	Usporedba pomaka u donjoj ploči nosača .....	37
Slika 25.	Usporedba pomaka u gornjoj ploči nosača .....	38
Slika 26.	Relativni gravimetar Scintrex CG-5 i njegovo sučelje [9] .....	40
Slika 27.	Primarni etaloni sile u Tübitak umjernom laboratoriju .....	41
Slika 28.	Vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije $b'$ uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A .....	54
Slika 29.	Vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije $b'$ uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1 .....	55
Slika 30.	Vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom $b$ uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A .....	55
Slika 31.	Vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom $b$ uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1 .....	56
Slika 32.	Vrijednosti relativne pogreške interpolacije uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A .....	56
Slika 33.	Vrijednosti relativne pogreške interpolacije uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1 .....	57
Slika 34.	Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A .....	58
Slika 35.	Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1 .....	58

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti) [3] .....	11
Tablica 2. Maksimalno dozvoljena razlika između stvarnih deformacija [8] .....	16
Tablica 3. Karakteristike prijenosnih etalona sile [8] .....	23
Tablica 4. Rezultati umjeravanja utega sile .....	40
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6' .....	42
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja .....	42
Tablica 7. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima .....	43
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja .....	43
Tablica 9. Izračunate vrijednosti pogrešaka .....	43
Tablica 10. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja ..	44
Tablica 11. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6' .....	45
Tablica 12. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja .....	45
Tablica 13. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima .....	46
Tablica 14. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja .....	46
Tablica 15. Izračunate vrijednosti pogrešaka .....	46
Tablica 16. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja ..	47
Tablica 17. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6' .....	48
Tablica 18. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja .....	49
Tablica 19. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima .....	49
Tablica 20. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja .....	49
Tablica 21. Izračunate vrijednosti pogrešaka .....	49
Tablica 22. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja ..	50
Tablica 23. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6' .....	51
Tablica 24. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja .....	51
Tablica 25. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima .....	52
Tablica 26. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja .....	52
Tablica 27. Izračunate vrijednosti pogrešaka .....	52
Tablica 28. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja ..	53



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$b$	%	Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom
$b'$	%	Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije
$c$	%	Relativna pogreška puzanja
$F$	N	Sila
$F_f$	N	Maksimalni kapacitet dinamometra
$F_N$	N	Nazivna sila
$f_c$	%	Relativna pogreška interpolacije
$f_0$	%	Relativna pogreška nule
$g$	$m/s^2$	Gravitacijsko ubrzanje
$i_f$	-	Očitanje na dinamometru nakon rasterećenja
$i_0$	-	Očitanje na dinamometru prije opterećenja
$i_{30}$	mV/V	Očitanje 30 sec. nakon primjenje ili rasterećenja sile
$i_{300}$	mV/V	Očitanje 300 sec. nakon primjenje ili rasterećenja sile
$K$	$^{\circ}C^{-1}$	Temperaturni koeficijent instrumenta
$m$	kg	Masa
$r$	N	Rezolucija uređaja za očitavanje
$v$	%	Relativna pogreška histereze
$X$	-	Očitanje kod rastuće sile
$X_a$	-	Interpolirana vrijednost očitavanja
$X'$	-	Očitanje kod padajuće sile
$X_i$	-	Individualna vrijednost očitavanja
$X_{max.}$	-	Maksimalna vrijednost očitavanja pri mjernim nizovima 1, 3 i 5
$X_{min.}$	-	Minimalna vrijednost očitavanja pri mjernim nizovima 1, 3 i 5
$X_N$	-	Očitanje kod nazivne sile
$X_r$	-	Srednja vrijednost očitavanja kod mjernih nizova s rotacijom
$X_{wr}$	-	Srednja vrijednost očitavanja kod mjernih nizova bez rotacije
$W$	-	Proširena mjerna nesigurnost
$W_c$	-	Sastavljena relativna standardna nesigurnost
$w_1$	-	Relativna standardna nesigurnost primjenjene sile
$w_2$	-	Relativna standardna nesigurnost obnovljivosti
$w_3$	-	Relativna standardna nesigurnost ponovljivosti
$w_4$	-	Relativna standardna nesigurnost rezolucije
$w_5$	-	Relativna standardna nesigurnost puzanja
$w_6$	-	Relativna standardna nesigurnost drifta nule
$w_7$	-	Relativna standardna nesigurnost temperature instrumenta
$w_8$	-	Relativna standardna nesigurnost interpolacije
$w_{rev}$	-	Relativna standardna nesigurnost uslijed histereze

$\Delta T$ 

°C

Temperaturni raspon tijekom umjeravanja

---

**SAŽETAK**

Mjeriteljstvo sile osnova je za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda te je od velikog značaja u različitim granama industrije gdje postoji potreba za mjerenjem vlačne ili tlačne sile. Pouzdano i točno mjerenje sile podrazumijeva primjenu odgovarajućih mjernih uređaja i tehnika na propisan način. Mjerna oprema koja se koristi pri mjerenju, bez obzira na primjenu, mora biti sljediva do primarnog etalona sile kojim se ostvaruje SI jedinica sile, Njutn (engl. Newton), sa točno izraženom mjernom sposobnošću. Sila je izvedena fizikalna jedinica što podrazumijeva realizaciju SI jedinice sile primjenom poznatih masa koje pod djelovanjem lokalne gravitacijske sile pritom ostvaruju silu poznatog iznosa.

Mehanička struktura koja ostvaruje silu direktno pomoću utega predstavlja primarni etalon sile (engl. deadweight machine) i nalazi se na vrhu lanca mjerne sljedivosti. Većina zemalja koje posjeduju Nacionalni mjerni institut ostvaruju Njutn na nacionalnom etalonu sile. Umjerni laboratorij vežu se na nacionalni etalon sile referentnim etalonima sile koji se koriste za umjeravanje prijenosnih etalona sile. Prijenosni etaloni sile koriste se direktno za provjeru sile ili za umjeravanje industrijskih mjerila sile kao što su kidalice i preše.

U sklopu ovog diplomskog rada konstruiran je i proračunat novi etalon sile nazivne vrijednosti 1000 N. Zatim je taj sustav umjeren pomoću dvaju posredničkih etalona tipa Z30A i U1 te je napravljen proračun mjerne nesigurnosti sustava za umjeravanje i uspoređen s onim umjerenim u Turskom nacionalnom institutu Tubitak.

Ključne riječi: mjeriteljstvo sile, lanac sljedivosti, primarni etalon sile, nacionalni etalon sile, prijenosni etaloni sile

---

**SUMMARY**

Force measurement is the basis for determining the mechanical properties of a material or product and is of great significance in a wide range of industrial applications, where there is the need to measure a tensile or compressive force. Reliable and accurate force measurement implies the application of appropriate measurement devices and techniques in a standardized way. The measuring equipment used, regardless of the application, must be traceable to a primary force standard, which realizes the SI unit of force, newton, with expressed measuring capability. The force is a derived physical unit which includes the realization of the SI unit of force by the use of known masses which, when subjected to the effect of local gravitational force, exert a known force on an earth located support.

The mechanical structure which generates force directly using weights represents a primary force standard, deadweight machine, and is located at the top of the force traceability chain. Most of the countries, having a national metrology institute (NMI), realize the newton in the national force standard machine. Number of calibration laboratories are linked to national force standard by force calibration machines on which force proving instruments are calibrated. These instruments may then be used either to measure forces directly or to calibrate industrial force-generating equipment, such as material testing machines.

This thesis will show the procedure for designing and analysis of a new primary force standard for measuring forces up to 1000 N. Further the thesis will demonstrate the process of calibrating the aforementioned standard, and proces of determinig of relative uncertainty values.

Key words: force measurement, traceability chain, primary force standard, national force standards, force proving instruments

## 1. UVOD

Jedna od općenito najvažnijih fizikalnih veličina je sila. Ona predstavlja iznimno važan pojam u strojarstvu i u drugim granama tehnike i znanosti. Pojavljuje se u različitim oblicima u svim mehanizmima i sustavima te je njeno poznavanje i mjerenje nužno za konstrukciju, izvedbu, primjenu i sigurnost raznih uređaja, kao i za određivanje brojnih svojstava različitih materijala.

Za različite sustave potrebne su različite točnosti mjerenja sile. Da bi se ostvarilo pouzdano i točno mjerenje, treba koristiti pravilne mjerne tehnike i uređaje. Da bi mjerila sile pružala zadovoljavajuću kvalitetu mjerenja, moraju biti umjerena. To znači da moraju biti „uspoređena“ s mjerilom na višoj mjeriteljskoj razini.

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava HMI/FSB-LIMS nositelj je nacionalnog etalona sile u području od 10 – 500 kN. Cilj HMI/FSB-LIMS-a proširiti je svoje područje akreditacije i na niže vrijednosti sile, a za ostvarenje toga potrebno je potvrditi njihov CMC (*eng* „Calibration and measurement capability“). MRA (Mutual Recognition Arrangement) je dogovor o međusobnom priznavanju nacionalnih etalona i certifikata umjeravanja i mjerenja koji se izdaju od strane nacionalnih mjeriteljskih instituta. Krajnji rezultat MRA usporedbi je iskaz i potvrđivanje umjernih i mjernih sposobnosti svakog mjeriteljskog instituta (CMC) navedenih u bazi podataka održavanoj od strane BIPM-a uz objavljivanje na Webu. Cilj svakog laboratorija je iskazati i potvrditi sposobnost mjerenja i umjeravanja CMC. Rezultati međulaboratorijskih usporedbi nužan su uvjet za proglašavanje i objavljivanje CMC vrijednosti.

U svrhu toga u sklopu ovog diplomskog rada proračunat je i konstruiran prihvrat za umjeravanje prijenosnih etalona sile, te je napravljen proračun mjerne nesigurnosti sustava za umjeravanje HMI/FSB-LIMS-a i uspoređen s onim umjerenim u Turskom nacionalnom institutu Tubitak.

U svrhu toga u sklopu ovog diplomskog rada biti će riječi o konstruiranju novog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N, numeričkoj analizi mogućih rješenja, kao i o važnosti i načinima mjerenja sile, te elementima mjeriteljstva koji osiguravaju pouzdanost i točnost mjerenja. Najviše će biti riječi o sljedivosti mjerenja sile, o etalonima sile te umjeravanju istih, a detaljnije će biti razrađeno umjeravanje referentnih etalona sile. U eksperimentalnom će se dijelu provesti umjeravanje referentnog etalona sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih

svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje. On će se umjeravati pomoću dvaju posredničkih etalona tipa Z30A i U1 nazivnih sila 200 N i 500N, akreditiranim u Turskom nacionalnom institutu Tübitak.

Podaci umjeravanja bit će obrađeni prema odgovarajućem matematičkom modelu, kako bi se naposljetku dobila proširena mjerna nesigurnost umjeravanja referentnog etalona HMI/FSB-LIMS - a.

## 2. MJERENJE SILE

### 2.1. Sila kao fizikalna veličina

Sila je jedna od temeljnih fizikalnih veličina u brojnim znanstvenim disciplinama te tehnici i tehnologiji. Silu kao fizikalnu veličinu možemo definirati kao mjeru interakcije među tijelima [1]. To je vektorska veličina, što znači da ima određeni iznos, ali i smjer djelovanja. Sila se pojavljuje u različitim oblicima – gravitacijska, elektromagnetska, atomska itd, ali teže ju je zamisliti nego masu ili duljinu, te je za razliku od mase treba stvoriti.

Djelovanje sile na neko tijelo može uzrokovati različite posljedice. Ovisno o porijeklu i obliku sile koja djeluje na promatrano tijelo, to mogu biti:

- promjena građe tijela,
- promjena oblika tijela,
- promjena položaja, tj. gibanje tijela.

U znanosti o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se prije svega zbog promatranja ponašanja materijala tijela, a pomoću toga određuju se brojna mehanička svojstva pojedinih materijala, koja su prije svega vezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine na materijal, s obzirom da je sila vektorska veličina. Prema tome razlikuju se različita opterećenja na materijal – vlak, tlak, smik, savijanje, torzija, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd. Silu i njeno djelovanje pobliže definiraju tri osnovna zakona – Newtonova zakona [2]:

- I. Newtonov zakon: Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok neka sila koja djeluje na njega to ne promijeni.
- II. Newtonov zakon: Ubrzanje je proporcionalno sili što djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile.
- III. Newtonov zakon: U međusobnom djelovanju dvaju tijela, ona djeluju jednakim, ali suprotno usmjerenim silama.

II. Newtonov zakon može se preoblikovati: kada je resultantna sila  $F$  koja djeluje na neko tijelo mase  $m$  različita od nule, tada će se to tijelo gibati ubrzanjem  $a$ . ovaj zakon se formulom prikazuje:

$$F = m \times a \quad (1)$$

Na njemu se temelji i definicija mjerne jedinice za silu, ali on ipak nije pogodan kao osnovni princip za mjerenje sile, već se većina mjerenja vrši na tijelima u ravnoteži.

Prema SI sustavu mjerna jedinica za silu je Newton [N]. To je izvedena SI jedinica, što znači da nema međunarodno dogovorene vrijednosti za etalon kao npr. 1 metar ili 1 kilogram. 1 Newton definiran je kao sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od  $1 \text{ m/s}^2$  [2].

Teško je u praksi dobiti 1 Newton iz ovakve definicije, tako da se standardno sile ostvaruju na temelju II. Newtonovog zakona primjenjenog u gravitacijskom polju Zemlje. Odnosno, tijelo poznate mase ( $m$ ) podvrgava se djelovanju lokalnog gravitacijskog ubrzanja ( $g$ ) te poznatom silom djeluje na potporu ( $F = m \times g$ ). Sustavi koji na ovaj način proizvode silu nazivaju se FSM – sustavima (Force Standard Machines).

## 2.2. Osnove mjerenja

Mjerenje sile vrlo je važno jer se na temelju toga određuju svojstva nekog materijala, dijela ili čitavog stroja. Mehanička svojstva materijala određuju kvalitetu nekog materijala, mogućnost njegove primjene te su važna za dimenzioniranje strojnih dijelova. Mjerenje sile u strojevima važno je zbog sigurnosti, montaže stroja i mogućnosti njegove primjene, kao i zbog razumijevanja i praćenja radnji za koje je stroj konstruiran. Dobra mjerenja, koja su u skladu s propisanim zahtjevima, imaju i značajan ekonomski utjecaj na neki proces ili uređaj te omogućuju pouzdanost uređaja.

Pri svakom mjerenju sile najvažnija je točnost mjerenja i mjerila te njihova usklađenost s istovrsnim mjerilima i mjerenjima drugih korisnika, bez obzira na različito vrijeme i lokaciju mjerenja. To je omogućeno postojanjem različitih etalona za silu, umjeravanjem istih i osiguranjem sljedivosti te postizanjem odgovarajućih mjernih nesigurnosti. Mjerna nesigurnost je sumnja u rezultat mjerenja, odnosno pokazatelj koliko je izmjereni rezultat blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine. Ona je jedan od bitnih faktora za osiguranje mjerne sljedivosti.

Sila se može mjeriti na dva osnovna načina: direktno i indirektno. Direktnom metodom se sila mjeri na vagama za mjerenje sile, čiji je princip izravno uspoređivanje sile s poznatom gravitacijskom težinom utega standardne mase, pri čemu su točno poznate masa i gravitacija. Indirektnom metodom se mjeri učinak sile na neko tijelo i to na dva načina:

- mjerenjem akceleracije tijela poznate mase na kojeg djeluje sila,
- mjerenjem resultantnog učinka (deformacije) elastičnog elementa na kojeg djeluje sila [3].



Mjerenje uz pomoć elastičnog elementa ima najširu primjenu, a na taj način se sila mjeri i u prijenosnim etalonima.

Ono što je vrlo važno kod mjerenja sile je aksijalnost. Naime, svaka sila koja djeluje na tijelo može se kao vektorska veličina rastaviti na tri komponente prema Kartezijevom koordinatnom sustavu, a ravnoteža se može zasebno promatrati u smjeru svake od tri osi sustava. Mnogi mjerni sustavi će često reagirati pravilno samo na sile uzduž glavne osi mjernog sustava, a ako aktivne sile imaju i komponente u drugim smjerovima, rezultati mjerenja mogu biti netočni.

Mjerila sile prema namjeni mogu biti:

- ispitna: kidalice i preše,
- etalonska: prijenosni etaloni sile, referentni etaloni sile i nacionalni etaloni sile

Na najnižoj razini piramide sljedivosti za mjerenje sile nalaze se kidalice i preše. To su uređaji koji služe za ispitivanje ponašanja materijala u uvjetima djelovanja sile (vlačne, tlačne, savojne ili smične). Način realizacije sile na kidalici može biti mehanički ili hidraulički, isto kao i način mjerenja sile. Kidalice se umjeravaju prijenosnim etalonima te se na taj način ostvaruje veza kroz piramidu sljedivosti prvo s referentnim, a dalje i s nacionalnim etalom.

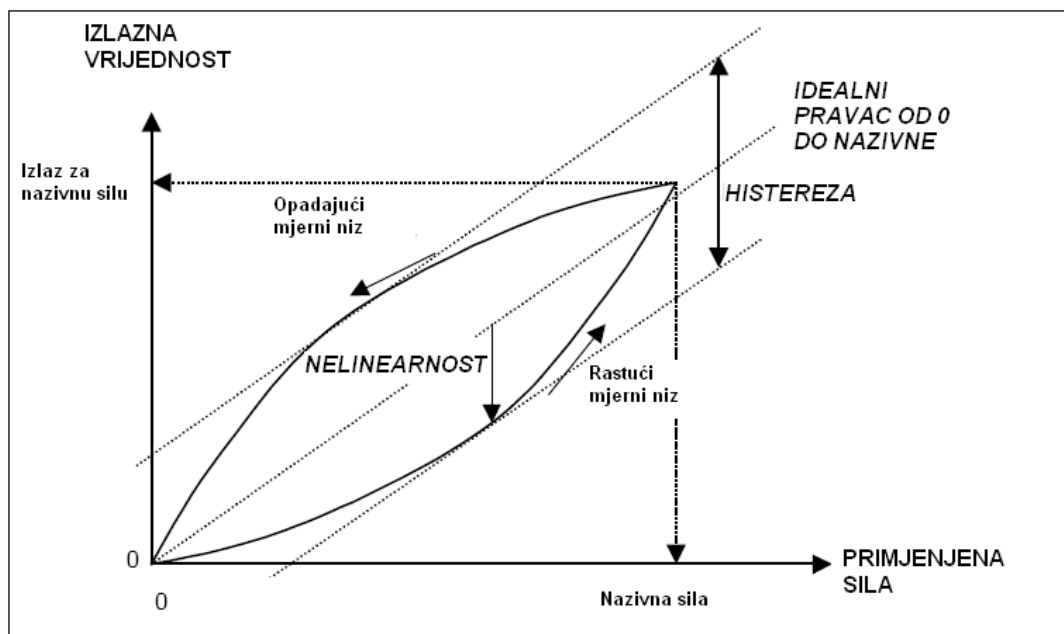
### 2.3. Karakteristike sustava za mjerenje sile

Sustav za mjerenje sile sastoji se od mjernog tijela (npr. elastično tijelo) i dodatnih dijelova: za dobivanje očitavanja (npr. mjerno pojačalo, slika 1), za povezivanje komponenti sustava (kabeli), za stabilnost sustava (nosači, antivibracijski temelji) itd.



Slika 1. Mjerno pojačalo [4]

Ponašanje sustava pri mjerenju može se prikazati grafički kao odnos izlazne veličine – očitavanja i ulazne veličine – narinute sile. Takav idealizirani prikaz dan je slikom 2, gdje se narinuta sila povećava od 0 do nazivne sile te potom smanjuje opet do 0.



**Slika 2.** Shematski prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [1]

Iz danog prikaza mogu se vidjeti neke osnovne karakteristike mjernog sustava za silu [1]:

- Nelinearnost je karakteristika svakog mjernog sustava koja pokazuje devijaciju položaja mjernih točaka od idealnog pravca koji povezuje silu od 0 i nazivnu silu sustava.
- Histereza je razlika očitavanja rastućeg i opadajućeg mjernog niza kod iste narinute sile.
- Pogreška mjerenja je razlika između očitane vrijednosti i stvarne vrijednosti sile.

Osim već navedenih, svaki mjerni sustav ima i sljedeće karakteristike [1]:

- Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja istih sila u istim mjernim uvjetima.
- Obnovljivost je rasipanje rezultata mjerenja istih sila, ali uz promjenu nekog mjernog uvjeta (npr. mjeritelja, metode mjerenja i sl.).
- Puzanje je promjena izlaznih podataka uslijed porasta sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.

- Povrat puzanja je promjena izlaznih podataka uslijed smanjenja sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.
- Drift je slabljenje mjeriteljskih značajki mjernog sustava kroz duži vremenski period.

Na mjerni sustav i njegovo djelovanje mogu utjecati brojni faktori [1]:

- dugoročna stabilnost samog mjernog sustava koja je određena brojnim faktorima (stabilnost mjernog tijela, zaštićenost pojedinih dijelova sustava, skladištenje, transport i upotreba mjernog sustava),
- uvjeti opterećenja: promjena distribucije sile na površinama i dijelovima na koje djeluje opterećenje, narušena aksijalnost djelovanja sile, nepropisno dinamičko opterećenje sustava,
- okolišni uvjeti: temperatura, vlaga i tlak zraka, promjene u naponskoj mreži, radio signal i drugo.

Ovisno o namjeni i vrsti sustava za mjerenje sile, postoje uvijek određeni zahtjevi za sustav, koji se moraju zadovoljiti kako bi sustav pravilno funkcionirao i davao zadovoljavajuće rezultate mjerenja.

## 2.4. Sljedivost, etaloni i umjeravanje etalona sila

Sljedivost se može definirati kao: „svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti“[5]. Sljedivost se ostvaruje neprekinutim nizom prijenosa vrijednosti neke veličine (umjeravanjem), počevši od etalona najviše mjeriteljske kakvoće (primarnog). Drugim riječima, da bi neko mjerilo za silu bilo valjano, mora se moći direktno povezati s primarnim etalom sile. Na slici 3 je prikazana piramida sljedivosti mjerenja sile.



Slika 3. Piramida sljedivosti mjerenja sile [4]

Osnovni elementi koji određuju sljedivost su [3]:

- neprekinuti lanac usporedbi kojim se može doći do etalona najviše mjeriteljske kakvoće,
- mjerna nesigurnost (za svaki dio lanca te za čitav lanac),
- dokumentacija za svaki korak u lancu,
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti potkrijepljena dokazima,
- upućivanje na SI jedinice,
- ponovna umjeravanja u određenim vremenskim periodima.

Ovisno o tome o kakvim se mjerilima ili etalonima radi, te na kojem su oni položaju u lancu usporedbi, sljedivost je moguće ostvariti na više načina [3]:

- preko umjernog laboratorija same tvrtke,
- preko ovlaštenog laboratorija,
- preko državne mjeriteljske ustanove,
- direktno do međunarodnog etalona,
- direktno do definicijskog etalona.

### 2.4.1. Etaloni sile

Općenito se etalon može definirati kao „materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogli poslužiti kao referencija“. Drugim riječima, etalon služi da bi se s njime uspoređivale sukladne mjere ili mjerila, kako bi krajnji korisnik dobio zadovoljavajuću točnost i pouzdanost mjerenja. Važno je da u slučaju sile etalon nije materijalizirana mjera (kao npr. 1 kilogram), već mjerilo.

Osnovni tipovi etalona su [3, 4] :

- **Primarni etalon** ima najvišu mjeriteljsku kakvoću i njegove se vrijednosti prihvaćaju bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- **Sekundarni etalon** ima vrijednost dodijeljenu usporedbom s primarnim etalom iste veličine.
- **Međunarodni etalon** je prihvaćen međunarodnim sporazumom kao međunarodna osnova za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona određene veličine.
- **Nacionalni/državni etalon** priznat je državnom odlukom da u nekoj državi služi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti ostalim etalonima određene veličine.
- **Referentni etalon** ima općenito najveću mjeriteljsku kakvoću na nekome području te služi za dodjeljivanje vrijednosti ostalim etalonima tog područja za određenu veličinu.
- **Posrednički etalon** upotrebljava se kao posrednik pri usporedbi drugih etalona te veličine (npr. usporedba nacionalnog i referentnog etalona).
- **Prijenosni etalon** je etalon takve izvedbe da se može prenositi na različita mjesta.
- **Radni etalon** redovito se upotrebljava za umjeravanje i provjeru mjera, mjerila ili referencijskih tvari.

Etalon najviše mjeriteljske kakvoće je primarni etalon. On se koristi isključivo za usporedbe s rezervnim ili referentnim etalom, a ne koristi se za izravna mjerenja. Njegove vrijednosti se prihvaćaju bez pozivanja na ostale etalone iste kakvoće.



**Slika 4. Primarni etalon sile 1 MN, PTB, Njemačka [6]**

Budući da je Newton izvedena jedinica u SI sustavu, kod etalona za silu ne postoji primarni etalon na međunarodnoj razini, nego su na najvišoj mjeriteljskoj razini primarni nacionalni etaloni za silu (force standard machines - FSM). Oni predstavljaju osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona, jer su na najvišoj razini piramide sljedivosti. Zbog toga se oni ne mogu sami umjeriti u nekom drugom etalonu, već se njihova mjeriteljska kakvoća provjerava u programima međulaboratorijskih usporednih ispitivanja. Kod primarnih nacionalnih etalona sila se ostvaruje direktno, isključivo preko utega, a ne polugama i sličnim elementima, pri čemu je masa utega određena preko referentnih etalona mase, a posljedica toga je relativna nesigurnost mjerenja manja ili jednaka  $2 \times 10^{-5}$  [1,3]. Na slici 4 je prikazan jedan takav etalon sile.

Referentni etaloni u piramidi sljedivosti su na razini niže od nacionalnih, a imaju najvišu mjeriteljsku kakvoću na nekom području, u kojem se koriste za sva mjerenja, te na taj način osiguravaju sljedivost između nacionalnog etalona i ostalih etalona i mjerila. Nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima. Oni su stabilni uređaji za mjerenje sile, različitih najboljih mjernih sposobnosti, koje ovise o realizacije sile u njima, tj. mehanizmu opterećenja.



Slika 5. Načini realizacije sile kod referentnih etalona [4]

Mogući mehanizmi s pripadajućim nesigurnostima prikazani su na slici 5, kao i u tablici 1, gdje je vidljivo da je mjerna nesigurnost najmanja kod opterećenja utezima (što je i razlog da se tako sila ostvaruje kod primarnih etalona). Na slici 6 prikazan je referentni etalon sile u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a.

**Tablica 1. Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti) [3]**

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Najbolja mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	$5 \times 10^{-5}$ do $1 \times 10^{-4}$
Hidraulični mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Polužni mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Komparatorni sustav	do $5 \times 10^{-3}$



**Slika 6. Referentni etalon HMI/FSB-LIMS [7]**

Prijenosni etaloni namijenjeni su prijenosu vrijednosti sile na različita mjesta, zbog čega su ponekad posebne konstrukcije. Koriste se za umjeravanje drugih etalona ili uređaja za mjerenje sile (npr. kidalica) koji su na nižoj mjeriteljskoj razini od referentnog etalona, a sami se umjeravaju na referentnim (ili rjeđe primarnim) etalonima. Na slici 7 nalazi se primjerak prijenosnog etalona.



**Slika 7. Prijenosni etalon sile [4]**

#### **2.4.2. Umjeravanje etalona sile**

Umjeravanje je postupak kojim se određuje odnos između veličine koju pokazuje mjerilo ili etalon sile niže mjeriteljske razine i odgovarajuće vrijednosti ostvarene etalomom sile više mjeriteljske razine. Svaki etalon ili mjerilo uvijek se umjerava s etalomom na višoj razini u piramidi sljedivosti [5].



U toku uporabe uređaji za mjerenje sile gube na svojoj mjeriteljskoj kvaliteti zbog oštećenja, kvarova, preopterećenja, istrošenja nekih dijelova itd. Umjeravanje se zato mora vršiti u određenim vremenskim periodima kako bi se redovito kontrolirala ispravnost i zadovoljavajuća mjerna nesigurnost mjerila i etalona. Umjeravanje svakog uređaja mora se vršiti u skladu s odgovarajućom normom jer jedino je na taj način moguće usklađivati i uspoređivati rezultate različitih mjerenja izvršenih od strane različitih mjeritelja na različitim mjernim uređajima. Europske norme koje se bave umjeravanjem mjernih uređaja za silu su HRN ISO 7500-1 i HRN EN ISO 376.

Umjeravanje mjerila i etalona sile nužno je, da se osigura odgovarajuća preciznost mjerila i traženi stupanj nesigurnosti, kako bi korisnik imao povjerenje u rezultat mjerenja. Redovitim umjeravanjem etalona i mjerila osigurava se sljedivost. Upravo su postupci umjeravanja ono što dovodi neko mjerilo ili etalon niže razine u direktnu vezu s primarnim etalom.

Mjerila i etaloni sile mogu se umjeravati sljedećim metodama:

- standardnim utezima,
- izbalansiranim polugama i standardnim utezima,
- elastičnim uređajima (prijenosni etaloni),
- kontrolnim epruvetama.

Osnovna ideja umjeravanja je usporedba poznatih ulaznih veličina kojima se opterećuje etalon ili mjerilo s izlaznim vrijednostima koje se očitavaju na njemu. Ulazna veličina ima neku utvrđenu mjernu nesigurnost koja se mora uzeti u obzir. Na rezultate mjerenja i njihovu mjernu nesigurnost mogu utjecati različiti vanjski i unutarnji faktori.

Vanjski utjecajni faktori su oni koji nisu vezani uz sami mjerni uređaj, a tu se mogu svrstati:

- uvjeti okoliša,
- rukovanje,
- umjerna oprema,
- software,
- umjeravana oprema,
- obrada podataka i
- mjerna strategija.

Unutarnji utjecajni faktori ovise o samom mjernom uređaju:

- dinamometar,
- mjerno pojačalo,
- software,
- prihvati,
- kabel i
- ostalo.

### **3. POSTUPAK UMJERAVANJA ETALONA SILE SUKLADNO NORMI HRN EN ISO 376 [8]**

#### **3.1. Preliminarna mjerenja**

Prije provođenja umjeravanja/ispitivanja dostavljenog prijenosnog etalona sile potrebno je osigurati tj. provjeriti da li je isti uopće moguće umjeriti. Navedeno se može provesti preliminarnim mjerenjima kao su što su:

- Test preopterećenja
- Provjera vezana uz primjenu sile
- Promjenjivi naponski test

##### **3.1.1. Test preopterećenja**

Prijenosni etalon sile podvrgava se, četiri puta uzastopno, preopterećenju koje je minimalno 8%, a maksimalno 12%, veće od nazivne sile samog prijenosnog etalona sile. Trajanje preopterećenja je u rasponu 60 s do 90 s. Navedeni test nužno je provesti barem jednom od strane proizvođača prije no što je instrument pušten u primjenu ili na umjeravanje.

##### **3.1.2. Provjera vezana uz primjenu sile**

*Potrebno je osigurati sljedeće:*

- da prihvatne naprave prijenosnog etalona sile omogućuju ostvarenje aksijalne sile u slučaju vlačnog ispitivanja;
- da nema interakcije između dinamometra i njegovog oslonca na referentnom etalonu sile u slučaju tlačnog ispitivanja.

Prijenosni etalon sile opterećen je preko prijelaznih dodirnih površina (intermediate bearing pads) cilindričnog oblika, konveksne ili konkavne površine koje su u kontaktu s bazom dinamometra.

Konkavne i konveksne površine smatraju se reprezentativnim granicama nedostatka ravnoće i varijacija u tvrdoći prijelaznih dodirnih površina na kojima uređaj može biti korišten tijekom svoje upotrebe.

Prijelazne dodirne površine izrađene su od čelika tvrdoće raspona 400 HV 30 – 650 HV 30. Konveksnost i konkavnost površine iznosi  $1,0 \pm 0,1$  na 1000 radijusa  $[(0,1 \pm 0,01)\%$  radijusa].

Ukoliko prijenosni etalon sile koji je podvrgnut umjeravanju posjeduje tlačne ploče tada one predstavljaju njegov integralni i sva daljnja umjeravanja se vrše uvijek s tlačnim pločama. Dinamometar i tlačne ploče opterećuju se naizmjenice preko konkavnih i konveksnih dodirnih površina.

Dvije sile primjenjuju se na prijenosni etalon sile, prva je maksimalna vrijednost sile dok je druga minimalna sila umjeravanja za koju se može odrediti deformacija (očitanje) dinamometra dostatna s pogleda ponovljivosti.

Test se ponavlja tri puta za svaku od tri tipa prijelaznih dodirnih površina (konkavnih, konveksih i ravnih) ukoliko postoje. Za svaku vrijednost sile razlika između stvarne deformacije izmjerene uporabom konkavnih i ravnih prijelaznih dodirnih površina i razlika stvarne deformacije uporabom konveksnih i ravnih dodirnih površina ne smije prelaziti vrijednosti prikazane u tablici 2, a obzirom na klasu prijenosnog etalona sile.

**Tablica 2. Maksimalno dozvoljena razlika između stvarnih deformacija [8]**

Klasa	Maksimalno dozvoljeno odstupanje, %	
	Pri maks. sili	Pri min. sili
0	0,05	0,1
0,5	0,1	0,2
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8

Ukoliko prijenosni etalon sile zadovoljava zahtjeve pri maksimalnoj vrijednosti sile, ali ne zadovoljava pri minimalnoj vrijednosti, određuje se najmanja vrijednost sile za koju instrument zadovoljava zahtijevano. Najmanji prirast sile koji se koristi da bi se odredila najmanja vrijednost sile koja zadovoljava gornje uvjete može procijeniti kvalificirani mjeritelj koji provodi umjeravanje.

Općenito, provjeru s prijelaznim dodirnim površinama nije potrebno ponavljati prilikom svakog umjeravanja, već nakon servisa prijenosnog etalona sile.

### **3.1.3. Promjenjivi naponski test**

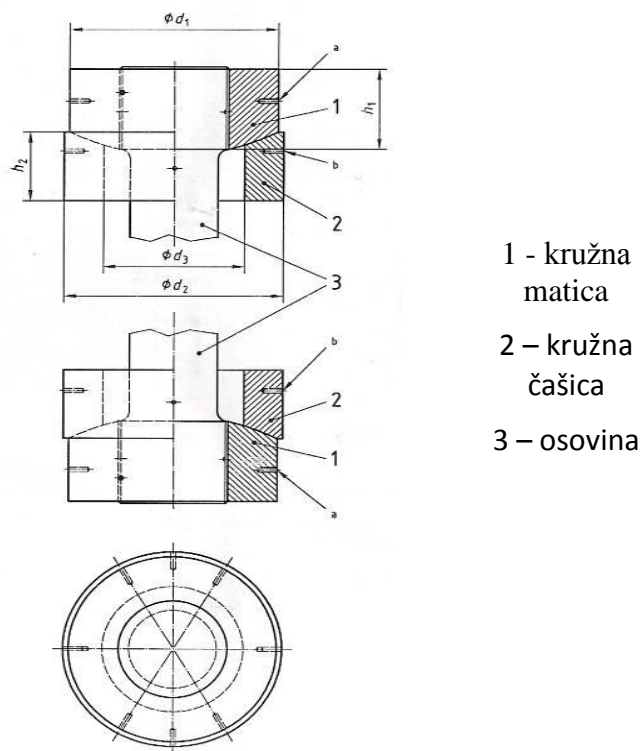
Za prijenosne etalone sile koji zahtijevaju električni izvor, može se provjeriti ima li promjena napona od  $\pm 10\%$  kakvog značajnijeg utjecaja. Navedena provjera može biti izvedena pomoću npr. simulatora dinamometra i nije nužna nego se ostavlja na volju mjeritelja.

### **3.1.4. Postavljanje prijenosnog etalona sile u referentni etalon**

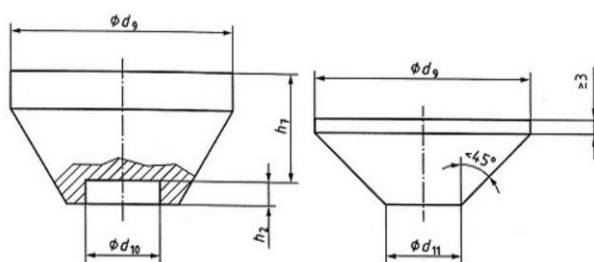
Postavljanje prijenosnog etalona sile u referentni vrši se uz obaveznu upotrebu vlačnih prihvatnih naprava ili tlačnih ploča. Sve aktivnosti provode se uz obavezno korištenje zaštitnih rukavica kako bi se spriječile temperaturne promjene na prijenosnom etalonu sile. Kod postavljanja prijenosnog etalona sile za smjer tlačnog opterećenja, treba izvršiti centriranje prema nepomičnoj tlačnoj ploči referentnog etalona sile (donja tlačna ploča) i posebnoj opremi kako bi se osigurala aksijalnost sile. Kod vlačnog opterećenja aksijalnost se osigurava prihvatnim napravama. Prijenosni etalon sile centrira se skupa s prihvatnim napravama. Prije bilo kakvog umjeravanja potrebno je provjeriti kontaktne površine tlačnih ploča referentnog etalona sile.

Prihvatne naprave moraju biti konstruirane tako da sila koja se primjenjuje bude aksijalna te predstavljaju integralni dio prijenosnog etalona sile. Uobičajeni prihvatni za vlak sastoje se od dvije kružne vijčane matice, kružne čašice i prijelaznih prstena, dok se za tlak koriste jedna ili dvije tlačne ploče.

Dimenzije i oblik prihvatnih naprava (vlačnih, tlačnih) preporučene su u informativnom dijelu - Aneks A norme HRN EN ISO 376:2012 i prikazane su na slikama 8 i 9.



Slika 8. Prihvatne naprave za vlak [8]



Slika 9. Tlačne ploče [8]

Preporuke za izradu i dimenzije zahtijevaju primjenu materijala koji ima vrijednost vlačne čvrstoće najmanje 350 N/mm<sup>2</sup>.

Ukoliko naručitelj nije dostavio prihvatne naprave ili tlačne ploče uz prijenosni etalon, potrebno ga je obavijestiti. Uz naručiteljevu suglasnost mogu se koristiti i naprave ili ploče HMI/FSB-LIMS-a. Ukoliko su dostavljeni prihvatni drugačijeg oblika, nužno je procijeniti njihov utjecaj na mjernu nesigurnost prijenosnog etalona sile.

### 3.1.5. Određivanje rezolucije uređaja za očitavanje

Prilikom postupka umjeravanja/ispitivanja prijenosnih etalona sile jedna od bitnih veličina koju treba zabilježiti prije samog početka umjeravanja je rezolucija uređaja za očitavanje. Rezolucijom se smatra očitavanje na uređaju za očitavanje u neopterećenom stanju. Ukoliko se očitavanje u neopterećenom stanju mijenja tj. vrijednosti na uređaju za očitavanje variraju za više od vrijednosti prethodno utvrđene kao rezolucija, prethodno utvrđena rezolucija se uvećava za polovinu raspona fluktuacije. Rezolucija,  $r$ , mora biti pretvorena i izražena u jedinicu za silu.

### 3.1.6. Analogna skala

Podjele na analognoj kružnoj skali moraju biti jednolike, dok debljina kazaljke skale mora biti otprilike jednaka debljini oznake podjele. Rezolucija,  $r$ , uređaja za očitavanje mora biti dobivena iz omjera debljine kazaljke i jedne podjele analogne kružne skale. Preporučeni omjeri su 1:2, 1:5 ili 1:10, pri čemu se razmak od 1,25 mm ili veći zahtjeva za omjer 1:10. Vernierova skala prikladana kao analogna skala može se koristiti kako bi se direktno očitavale frakcijske vrijednosti podjele skale.

### 3.1.7. Digitalna skala

Rezolucijom se smatra jedan korak povećanja zadnjeg aktivnog broja na digitalnom pokazivaču.

Uzimajući u obzir točnost s kojom možemo očitati elastičnu deformaciju prijenosnog etalona sile tj. dinamometra tijekom samog postupka umjeravanja ili tijekom uporabe (prilikom umjeravanja kidalica) prijenosni etalon sile mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

a) minimalna vrijednost primjenjive sile mora biti veća ili jednaka:

- - 4000 x  $r$  za klasu 00;
- - 2000 x  $r$  za klasu 0,5;
- - 1000 x  $r$  za klasu 1;
- - 500 x  $r$  za klasu 2.

b) minimalna sila mora biti veća ili jednaka 0,02  $F_f$ .

### 3.2. Umjeravanje

Prijenosni etalon sile postavlja se u referentni etalon nakon što je izvršeno temperiranje u trajanju od minimalno 30 minuta u skladu s HRN EN ISO 376 i nakon što je popunjen zapis za umjeravanje prijenosnog etalona sile, koji obuhvaća sve potrebne podatke o integralnim dijelovima prijenosnog etalona sile.

Umjeravanje se sastoji od primjene preciznih, točno određenih vrijednosti sila na prijenosni etalon sile, točnije dinamometar, te zabilježbe vrijednosti očitanih s uređaja za očitavanje, u najvećem broj slučajeva mjernog pojačala, koji je integralni dio prijenosnog etalona sile.

Umjeravanje može biti provedeno na dva načina, ovisno o tome hoće li se nakon njega prijenosni etalon koristiti za rastuće i opadajuće vrijednosti sila ili samo za rastuće vrijednosti. Ukoliko će se koristiti za rastuće i opadajuće vrijednosti sila (tj. za povratna mjerenja), obavezno je utvrditi histerezu prijenosnog etalona, ali nije nužno ispitati njegovo puzanje. Ukoliko će se etalon koristiti samo za rastuće vrijednosti sila, nije potrebno utvrđivati histerezu, ali je obavezno umjesto toga provesti ispitivanje na puzanje.

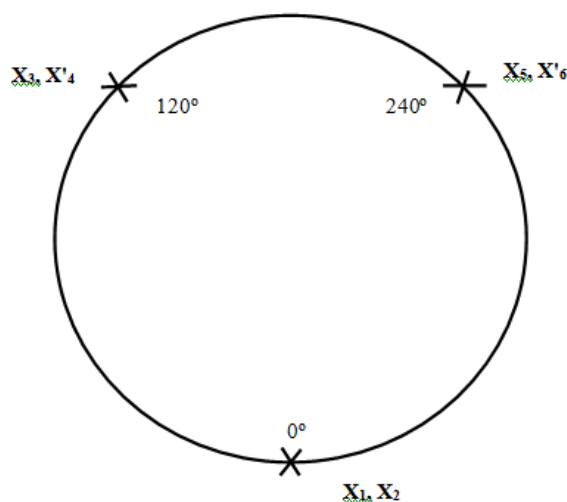
Prije primjene sila samog umjeravanja, potrebno je u odgovarajućem smjeru (vlak ili tlak) primijeniti nazivnu silu na prijenosni etalon i to barem tri puta. Trajanje svakog ovakvog predopterećenja treba biti između 60 s i 90 s.

Nakon predopterećenja na prijenosni etalon sile djeluje se silama u dva rastuća mjerna niza, i to bez pomicanja dinamometra.

Potom se djeluje na prijenosni etalon sile u još barem dva rastuća mjerna niza, te, ukoliko se etalon treba umjeriti i za opadajuće sile, u još barem dva opadajuća mjerna niza sila.

Između susjednih nizova mjerenja potrebno je zaokrenuti dinamometar oko vlastite osi ravnomjerno raspoređeno kroz  $360^\circ$  (npr. na  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ). Ukoliko nije moguće pozicioniranje dinamometra u tri navedene pozicije, dozvoljena je prilagodba zakretanja u sljedeće pozicije:  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$  (vidjeti sliku 10).





**Slika 10. Pozicije dinamometra pri umjeravanju [8]**

Za određivanje interpolacijske krivulje broj primijenjenih sila ne smije biti manji od 8 i sile trebaju biti raspoređene jednoliko po cijelom mjernom području.

Ukoliko postoji sumnja na periodičku pogrešku, preporuča se izbjegavanje intervala među silama koji odgovara periodičnosti te pogreške.

Prijenosni etalon sile treba biti predopterećen tri puta u smjeru u kojem će biti opterećen narednim nizom sila tijekom umjeravanja.

Promjenom smjera opterećenja potrebno je provesti ponovno predopterećenje u odgovarajućem novom smjeru.

Očitanje u neopterećenom stanju bilježi se najmanje 30 sekundi nakon što je dinamometar rasterećen.

Vremenski interval između dva uzastopna mjerna niza mora iznositi najmanje 3 minute.

Prije samog postupka umjeravanja potrebno je zabilježiti vrijednost nul-signalu dinamometra u neopterećenom stanju.

Vremenski interval između dva uzastopna mjerna niza mora biti što jednoličniji i nikakvo očitavanje se ne smije uzimati unutar 30 s od promjene sile.

Ukoliko se provodi ispitivanje puzanja, potrebno je zabilježiti očitavanje prijenosnog etalona sile 30 s i 300 s nakon primjene ili nakon rasterećenja nazivne sile. Ispitivanje je potrebno provesti za svaki zadani način opterećenja.

Ukoliko se puzanje mjeri nakon rasterećenja, nazivna sila kojom se prethodno djeluje treba djelovati barem 60 s prije nego se dinamometar rastereti. Ispitivanje puzanja može se provesti bilo kada tijekom umjeravanja, ali nakon početnih predopterećenja.

U HMI/FSB-LIMS-u se test puzanja provodi nakon zadnjeg mjernog niza, a očitavanja se bilježe i na nazivnoj sili i na nuli nakon rasterećenja s nazivne sile.

### 3.3. Obrada rezultata i klasifikacija prijenosnog etalona sile

Nakon provedenog umjeravanja provodi se obrada rezultata koji su u konačnom obliku prikazani u potvrdi o umjeravanju prijenosnog etalona sile ili izvještaju o mjerenju, ovisno o tome zadovoljava li prijenosni etalon sile zahtjeve propisane normom HRN EN ISO 376.

Nakon završetka umjeravanja ili ispitivanja prijenosnog etalona sile, potrebno je analizirati rezultate te na temelju dobivenih vrijednosti donijeti zaključke o stanju i klasi prijenosnog etalona sile. Rezultati umjeravanja/ispitivanja integralni su dio Potvrde o umjeravanju/Izvješća o mjerenju i predstavljaju kriterij po kojem se klasificira prijenosni etalon sile.

Područje klasifikacije prijenosnog etalona sile mora biti minimalno u mjernom području od 50% – 100% nazivne vrijednosti sile.

Prijenosni etalon sile može se klasificirati za specifične sile ili za interpolirane, te samo za rastuće opterećenje ili za rastuće i opadajuće opterećenje.

SLUČAJ A – Kod uređaja koji se klasificiraju samo za specifične sile i samo za rastuće opterećivanje, razmatraju se sljedeći kriteriji:

- relativne pogreške obnovljivosti, ponovljivosti i nule
- relativna pogreška puzanja

SLUČAJ B – Kod uređaja koji se klasificiraju samo za specifične sile i za rastuće/opadajuće opterećivanje, razmatraju se sljedeći kriteriji:

- relativne pogreške obnovljivosti, ponovljivosti i nule
- relativna pogreška histereze

SLUČAJ C – Kod uređaja koji se klasificiraju za interpolirane sile i samo za rastuće opterećivanje, razmatraju se sljedeći kriteriji:

- relativne pogreške obnovljivosti, ponovljivosti i nule;
- relativna pogreška interpolacije
- relativna pogreška puzanja.

SLUČAJ D – Kod uređaja koji se klasificiraju za interpolirane sile i za rastuće/opadajuće opterećivanje, razmatraju se sljedeći kriteriji:

- relativne pogreške obnovljivosti, ponovljivosti i nule;
- relativna pogreška interpolacije;
- relativna pogreška histereze.

Tablica 3 prikazuje maksimalne dopuštene vrijednosti pojedinih parametara u skladu s klasom prijenosnog etalona sile, kao i zahtijevanu nesigurnost primijenjene sile umjeravanja.

**Tablica 3. Karakteristike prijenosnih etalona sile [8]**

Klasa	Relativne pogreške prijenosnog etalon sile, %						Proširena nesigurnost primijenjene sile umjeravanja, %
	<b>b</b>	<b>b'</b>	$f_c$	$f_o$	$\nu$	<b>c</b>	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	0,025	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	0,05	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	0,30	0,10	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	0,20	$\pm 0,10$

Mjerno područje za koje se klasificira prijenosni etalon sile određuje se tako da svaka točka, jedna za drugom, počevši od maksimalne tj. nazivne sile, zadovoljava zahtijevane kriterije. Klasificirano mjerno područje završava na zadnjoj točki u kojoj su zadovoljeni kriteriji klasifikacije.

Analiza mjernih rezultata i izračun pojedinih relativnih pogrešaka radi se na temelju očitavanja koja u većini slučajeva predstavljaju elastičnu deformaciju dinamometra. Deformacija se može definirati kao razlika između očitavanja u trenutku djelovanja sile i očitavanja u trenutku kad dinamometar nije opterećen. Navedena definicija deformacije vrijedi za izlazne vrijednosti očitavanja u električnim jedinicama (mV/V, V...), kao i za jedinice duljine.

### 3.3.1. Izračun relativnih pogrešaka

#### 3.3.1.1. Relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti, $b$ i $b'$

Ove pogreške računaju se za svaku silu umjeravanja, tj. s rotacijom dinamometra ( $b$ ) i bez rotacije dinamometra ( $b'$ ), koristeći sljedeće izraze:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\overline{X}_r} \right| \times 100 \quad (2)$$

gdje je

$$\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (3)$$

i

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right| \times 100 \quad (4)$$

gdje je

$$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (5)$$

#### 3.3.1.2. Relativna pogreška interpolacije, $f_c$

Ova pogreška određuje se pomoću jednadžbe polinoma prvog, drugog ili trećeg reda kojom se očitavanje može izraziti kao funkcija sile umjeravanja. Korištenu jednadžbu potrebno je staviti u potvrdu o umjeravanju. Relativna pogreška interpolacije računa se iz sljedećeg izraza:

$$f_c = \frac{\overline{X}_r - X_a}{X_a} \times 100 \quad (6)$$

#### 3.3.1.3. Relativna pogreška nule, $f_0$

Očitavanje pri nuli treba zabilježiti nakon svakog niza mjerenja. Očitavanje pri nuli uzima se otprilike 30 s nakon potpunog prestanka djelovanja sile. Relativna pogreška nule računa se iz izraza:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (7)$$

U obzir je dalje potrebno uzimati najveću procijenjenu pogrešku nule.

#### 3.3.1.4. Relativna pogreška histereze, $v$

Relativna pogreška histereze određuje se za svaku silu umjeravanja, tako da se provodi opterećenje rastućim silama i opadajućim silama.

Razlika između očitavanja oba niza, s rastućim silama i opadajućim silama, omogućuje izračun relativne pogreške histereze preko sljedećih izraza:

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad (8)$$

i

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad (9)$$

dok se  $v$  računa kao srednja vrijednost  $v_1$  i  $v_2$ .

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (10)$$

Ovaj postupak određuje samo kombiniranu histerezu umjeravanog etalona i uređaja u kojem se umjerava. Za točnije određivanje histereze umjeravanog etalona, može se provesti umjeravanje na etalonima sile s direktnim opterećivanjem pomoću utega. Za ostale tipove umjernih uređaja, treba uzeti u obzir i njihovu histerezu.

### 3.3.1.5. Relativna pogreška puzanja, $c$

Potrebno je izračunati razliku između očitavanja uzetih 30 s i 300 s nakon početka djelovanja nazivne sile ili nakon rasterećenja s nazivne sile te izraziti tu razliku kao udio nazivne sile:

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \times 100 \quad (11)$$

Ukoliko etalon sile zadovoljava zahtjeve norme HRN EN ISO 376 u trenutku umjeravanja, nadležno tijelo dužno je izdati potvrdu o umjeravanju prijenosnog etalona sile u skladu s normom.

Sukladno HRN EN ISO 376, maksimalni period valjanosti potvrde o umjeravanju ne smije preći 26 mjeseci. Prijenosni etalon sile potrebno je ponovo umjeriti i kada je bio izložen preopterećenju ili nakon popravka.

Ukoliko prijenosni etalon sile ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN ISO 376 u trenutku umjeravanja, nadležno tijelo dužno je izdati izvještaj o mjerenju koji potvrđuje navedeno na temelju obrade rezultata provedenog ispitivanja, koji su također prikazani u izvješću.

### 3.4. Opis procjene i proračuna mjerne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile

#### 3.4.1. Općenito

Za svaku silu umjeravanja potrebno je procijeniti i izračunati mjernu nesigurnost. Nesigurnost se računa pomoću očitavanja dobivenih tijekom umjeravanja i nekih konstantnih parametara. Nesigurnost uključuje utjecaje: primijenjene sile umjeravanja, ponovljivosti i obnovljivosti rezultata, rezolucije uređaja za očitavanje, puzanja uređaja, drifta uređaja pri nuli i temperature umjeravanja. Također može uključivati: utjecaj interpolacije ukoliko se uređaj klasificira za interpolirane vrijednosti sile te utjecaj histereze ukoliko se uređaj klasificira za rastuće i opadajuće vrijednosti sile.

Nesigurnost se može izraziti u jedinicama sile, ali i relativno u postocima.

Proračun i procjena proširene mjerne nesigurnosti  $W$  umjeravanja prijenosnih etalona sile temelji se na dokumentima HRN EN ISO 376:2012 I EURAMET cg-4. Dobiva se iz sastavljene relativne nesigurnosti  $w_c$  (sastavljena od relativnih standardnih nesigurnosti  $w_i$ ) i faktora prekrivanja  $k$ :

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2} \quad (12)$$

i

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

#### 3.4.2. Relativne standardne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile

##### 3.4.2.1. Relativna standardna mjerna nesigurnost primijenjene sile, $w_1$

Relativna standardna nesigurnost primijenjene sile,  $w_1$ , općenito jednaka je najboljoj mjernoj sposobnosti etalona na kojem se provodi umjeravanje podijeljena s vrijednošću faktora pokrivanja,  $k$ , i računa se prema sljedećem izrazu:

$$w_1 = \frac{w_{bmc}}{k} \quad (14)$$

3.4.2.2. *Relativna standardna mjerna nesigurnost obnovljivosti,  $w_2$* 

Komponenta nesigurnosti uslijed obnovljivosti može se definirati kao standardna devijacija srednje vrijednosti očitavanja pri mjernim nizovima  $X_1, X_3, i X_5$  te je izražena sljedećim izrazom:

$$w_2 = \frac{1}{|\overline{X_r}|} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \overline{X_r})^2} \quad (15)$$

3.4.2.3. *Relativna standardna mjerna nesigurnost ponovljivosti,  $w_3$* 

Komponenta nesigurnosti uslijed ponovljivosti izmjerenih vrijednosti očitavanja pri prvom i drugom mjernom nizu ( $X_1, X_2$ ) određuje se prema sljedećem matematičkom izrazu:

$$w_3 = \frac{b'}{100 \times \sqrt{3}} \quad (16)$$

3.4.2.4. *Relativna standardna mjerna nesigurnost rezolucije,  $w_4$* 

Vrijednost rezolucije uzima se u obzir dva puta primjenom dvije pravokutne razdiobe, svaka sa standardnom nesigurnošću  $r/(2\sqrt{3})$  gdje je  $r$  rezolucija). Navdeno je jednako jednoj trokutnoj razdiobi sa standardnom nesigurnošću  $r/\sqrt{6}$  i izražava se za svaku primijenjenu silu prema sljedećoj jednadžbi:

$$w_4 = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{r}{F} \quad (17)$$

3.4.2.5. *Relativna standardna mjerna nesigurnost puzanja,  $w_5$* 

Komponenta nesigurnosti uslijed puzanja odnosi se na činjenicu da na izmjerenu vrijednost mogu utjecati prethodno provedena mjerenja odnosno primijenjena opterećenja. Mjera navedenog utjecaja je promjena izlaznog signala prijenosnog etalona sile u trajanju od 30 do 300 sekundi nakon primjene ili rasterećenja maksimalne tj. nazivne sile. Navedeni utjecaj računa se prema sljedećem izrazu:

$$w_5 = \frac{c}{100 \times \sqrt{3}} \quad (18)$$

Ukoliko se tijekom umjeravanja ne provodi ispitivanje puzanja, nesigurnost puzanja može se procijeniti iz pogreške histereze iz sljedećeg izraza:

$$w_5 = \frac{v}{100 \times 3\sqrt{3}} \quad (19)$$

3.4.2.6. *Relativna standardna mjerna nesigurnost nule,  $w_6$* 

Komponenta nesigurnosti uslijed mogućnosti varijacije očitavanja nule između različitih mjernih nizova te očitana vrijednost može biti funkcija vremena provedenog na nuli. Navedeni utjecaj nije uvršten u proračun obnovljivosti iz razloga što bi pauza tj. vremenski interval trebao biti isti za sve mjerne nizove. Veličina koja definira navedeno je relativna pogreška nule sukladno HRN EN ISO 376 pa se shodno tome nesigurnost nule može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$w_6 = \frac{f_0}{100} \quad (20)$$

3.4.2.7. *Relativna standardna mjerna nesigurnost temperature,  $w_7$* 

Komponenta nesigurnosti koje se odnosi na temperaturne promjene tijekom samog postupka umjeravanja prijenosnih etalona sile. Temperaturna osjetljivost instrumenta mora biti određena ispitivanjem ili od strane proizvođača. Najčešće ona je određena od strane proizvođača te se određuje kao relativna vrijednost prema sljedećem izrazu:

$$w_7 = K \times \frac{\Delta T}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Gdje je:

- $K$  – temperaturni koeficijent instrumenta,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$
- $\Delta T$  - temperaturni raspon tijekom umjeravanja

Važno je za napomenuti da će utjecaj ove komponentne općenito biti zanemariv ( $\Delta T$  vrlo vjerojatno neće biti veći od  $2^{\circ}\text{C}$ , a tipična vrijednost  $K=0,00005^{\circ}\text{C}^{-1}$  dajući pri tome vrijednost  $w_7 = 0.003 \%$  što je manje od doprinosa mjernoj nesigurnosti klase 00.

3.4.2.8. *Relativna standardna mjerna nesigurnost interpolacije,  $w_8$* 

Komponenta nesigurnosti uslijed interpolacije ne uzima se u obzir za proračun mjerne nesigurnosti prijenosnih etalona sile koji se klasificiraju za točno određene vrijednosti sile. U slučajevima kada se koristi interpolacijska krivulja nesigurnost interpolacije mora se uzeti u obzir obzirom da vrijednosti očitavanja pri određenim silama dobivene interpolacijskom krivuljom nisu idealne vrijednosti što uzrokuje određenu nesigurnost.

Metodom devijacije određuje se komponenta nesigurnosti koja predstavlja razliku između srednjih vrijednosti očitavanja izmjerenih kod mjernih nizova s rotacijom,  $\overline{X_r}$ , i vrijednosti izračunatih jednadžbom interpolacije,  $X_a$ , izražene kao relativna vrijednost:



$$w_8 = \left| \frac{\overline{X}_r - X_a}{\overline{X}} \right| \quad (22)$$

#### 3.4.2.9. *Sastavljena relativna standardna nesigurnost $w_c$ i proširena mjerna nesigurnost umjeravanja prijenosnih etalona sile, $W$*

Za svaku silu umjeravanja, sastavljena relativna standardna nesigurnost računa se iz pojedinih sastavnica standardnih nesigurnosti prema izrazu:

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (23)$$

Potrebno je izraditi dijagram ovisnosti  $w_c$  i sile te odrediti koeficijente krivulje fitanja (eng. To fit, fitted) metodom najmanjih kvadrata. Oblik fitane linije (npr. linearni, polinomni, eksponencijalni) ovisi ponajviše o rezultatima umjeravanja. Ukoliko su dobivene fitane vrijednosti niže nego minimalna sastavljena nesigurnost, potrebno je pronaći konzervativniju krivulju fitanja i/ili se minimalna vrijednost nesigurnosti specificira samo za određeni dio umjeravanog područja. Preporuka je da ta vrijednost bude jednaka postignutoj minimalnoj sastavljenoj nesigurnosti. Proširena nesigurnost,  $W$ , dobiva se jednadžbom s koeficijentima koji su dvostruko veći od koeficijenata fitane krivulje. Na taj način se za bilo koji dio mjernog područja može izračunati proširena nesigurnost izražena kao relativna vrijednost.

Proširena relativna nesigurnost izražava se jednadžbom također (uz faktor pokrivanja  $k = 2$ ):

$$W = k \times w_c \quad (24)$$

ukoliko se kao  $w_c$  uzme fitana vrijednost iz gore opisanog postupka.

#### 3.4.2.10. *Utjecaj histereze na nesigurnost prijenosnog etalona sile*

Ukoliko će se prijenosni etalon sile nakon umjeravanja koristiti i u silaznim nizovima sila, treba se zasebno proračunati relativna standardna nesigurnost histereze iz izraza:

$$w_{rev} = \frac{v}{100 \times \sqrt{3}} \quad (25)$$

Navedenu komponentu treba se uključiti i u sastavljenu relativnu nesigurnost umjeravanja prijenosnog etalona sile ili iskazati zasebno.

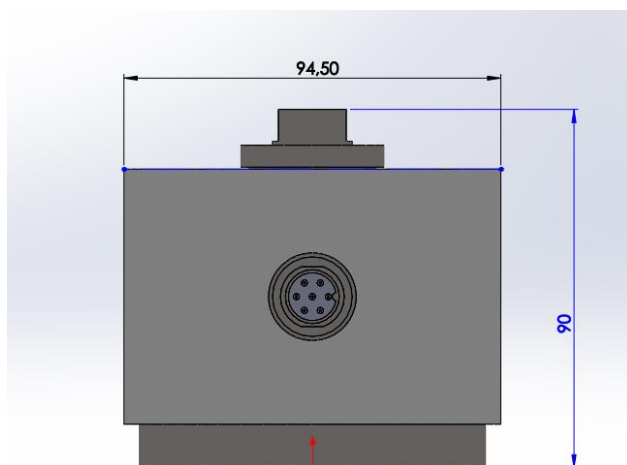
## 4. IDEJNO RJEŠENJE PRIHVATA ZA UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE DO 1 kN

### 4.1. Konstrukcija okvira nosača utega

Kod uređaja sa direktnim opterećivanjem utezima (deadweight) za mjerenje sila do 2 kN uobičajena je upotreba okvira nosača za utege sila uz pomoć kojeg se vrši opterećenje silom na prijenosni etalon mehanizmom dodavanja odnosno uklanjanja utega. Najčešće korištena izvedba okvira nosača utega jest ona sa 2 kraka, dok će se u ovom radu koristiti i ona izvedba sa tri kraka.

Za potrebe HMI/FSB-LIMS-a nužno je konstruirati okvir nosača za utege sila kojim bi se omogućilo ispitivanje dinamometara nazivnog kapaciteta do 1 kN, i to u oba smjera (vlak i tlak).

Uzevši grube dimenzije korištenih dinamometara (slika 11), okvir nosača potrebno je dimenzionirati tako da se omogući što lakše korištenje istim, po mogućnosti bez rastavljanja, što bi pridonjelo boljim mjernim nesigurnostima.

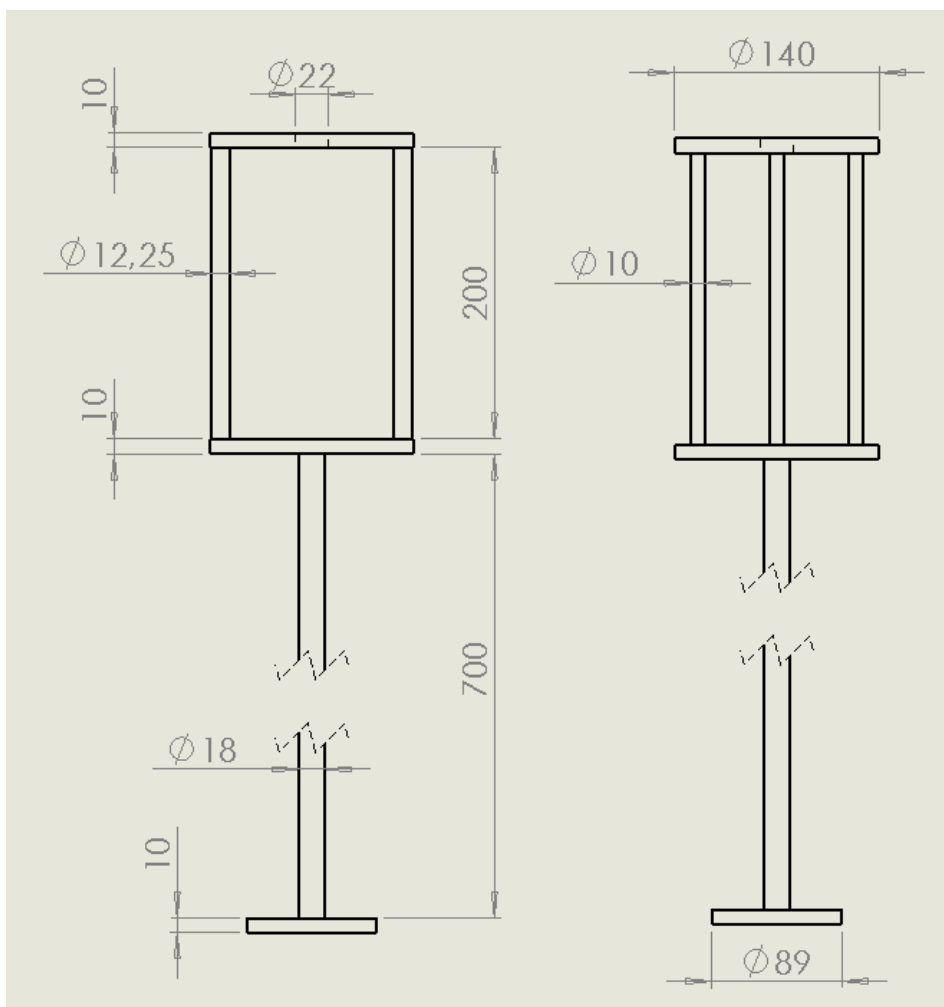


**Slika 11. Vanjske dimenzije dinamometra**

Okvir nosača biti će sačinjen od dvije ploče (gornja i donja) debljine 10 mm, međusobno spojene dvjema šipkama (krakovi) promjera 12,25 mm, odnosno trima promjera 10 mm kako bi se osigurala podjednaka površina poprečnog presjeka. Također će za oba slučaja šipke biti jednoliko raspoređene po kružnici promjera 125 mm, kako bi rezultati analize u nastavku rada mogli biti usporedivi. Promjer gornje i donje ploče iznosi 140 mm. Gornja ploča sadrži središnji provrt promjera 22 mm, čime se omogućava uvješavanje okvira nosača o dinamometar u slučaju ispitivanja vlačnih opterećenja dinamometra. Visina šipki iznosi 200 mm čime se omogućava nesmetana montaža te uklanjanje okvira nosača na dinamometar tokom vršenja procedure

umjeravanja. Na donju ploču pričvršćena je osovina za utege sila sa baznom pločom na koju se dodaju utezi. Promjer osovine za utege sila ograničena je promjerom koji se nalazi na utezima (19,6 mm), te će se koristiti promjer od 18 mm kako bi se olakšalo dodavanje, odnosno uklanjanje utega u stvarnim uvjetima korištenja. Dužina osovine za utege sila definirana je nazivnim mjernim područjem uređaja za mjerenje sile, kako bi se osiguralo dovoljno prostora za sve korištene utege. U ovom slučaju ta dužina iznosi 700 mm. Promjer bazne ploče definiran je oblikom utega te iznosi 89 mm. Debljina bazne ploče iznositi će 10 mm.

Na slici 12 možemo vidjeti grafičku reprezentaciju svih navedenih dimenzija.



Slika 12. Dimenzije okvira nosača utega sile

#### 4.2. Analiza rješenja okvira za utege sila

U svrhu određivanja povoljnijeg rješenja konstrukcije okvira nosača utega ... provedena je analiza konačnim elementima. Analiza je provedena pomoću softverskog paketa za konačne elemente Ansys (verzija 16.0). Za materijal okvira izabran je konstrukcijski čelik S235.

Na slici 13 prikazan je pojednostavljeni model okvira nosača utega sa dva kraka. Geometrijske značajke kao što su zavari i skošenja su izostavljeni zbog pojednostavljenja modela i bolje kvalitete mreže konačnih elemenata. Gore spomenuta pojednostavljenja geometrije nemaju značajnog utjecaja na ishod rezultata.

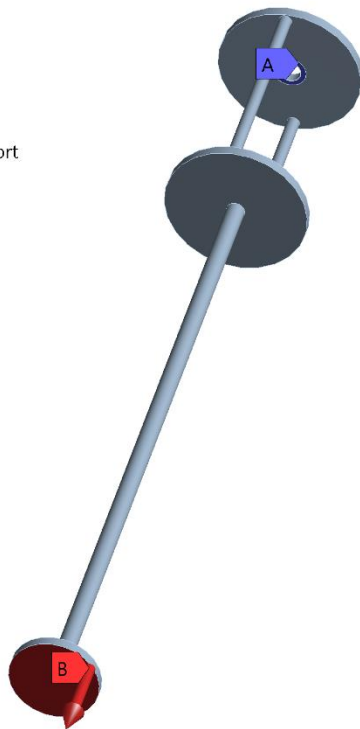
Geometry  
11/27/2016 5:44 PM



**Slika 13. Pojednostavljeni model okvira nosača utega sa dva kraka**

Slika 14 prikazuje primijenjene rubne uvijete i opterećenja modela.

**A: 2 kraka**  
Static Structural  
Time: 1. s  
11/27/2016 5:46 PM  
**A** Frictionless Support  
**B** Force: 1000. N



**Slika 14. Primijenjeni rubni uvjeti**

Donja ploča opterećena je silom od 1000 N (pozicija B, slika 14). Rubni uvjeti pomaka zadani su na kontaktnoj površini (pozicija A, slika 14) s prstenom na koji će ta ploča nalijegati prilikom vršenja mjerenja.

Na slici 15 prikazana je mreža konačnih elemenata. Model je aproksimiran sa 19000 elemenata i 67000 čvorova (većinom heksagonalnim HEX-20 i tetragonalnim TET-10 elementima).



**Slika 15. Mreža konačnih elemenata**

Izvršena je analiza konačnim elementima, te su dobivene slijedeće grafičke reprezentacije rezultata.

Na slici 16 prikazani su pomaci u modelu sa dva kraka. Treba naglasiti kako je riječ o višestruko naglašenom (1000x) grafičkom prikazu, dok u stvarnosti pomaci ne prelaze veličinu od 0,06 mm, što se može i vidjeti iz mjerila sa spomenute slike.

A: 2 kraka  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
11/27/2016 5:56 PM

0.059577 Max  
0.052958  
0.04634  
0.039721  
0.033102  
0.026484  
0.019865  
0.013246  
0.0066278  
9.1083e-6 Min

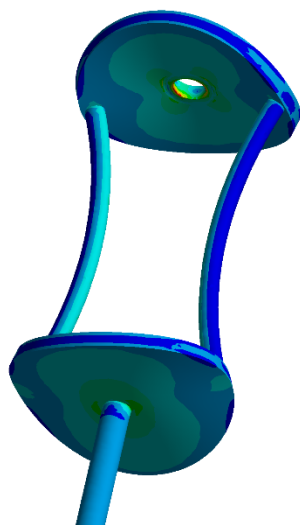


Slika 16. Pomaci u modelu sa dva kraka

Na slici 17 prikazan je raspored naprezanja u modelu. Treba primijetiti kako maksimalan iznos naprezanja u modelu nije dostatan za prouzročenje trajne plastične deformacije koja bi bila izrazito nepovoljna za mjerne uređaje.

A: 2 kraka  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
11/27/2016 5:57 PM

30.638 Max  
27.236  
23.834  
20.432  
17.03  
13.628  
10.226  
6.8242  
3.4222  
0.020193 Min

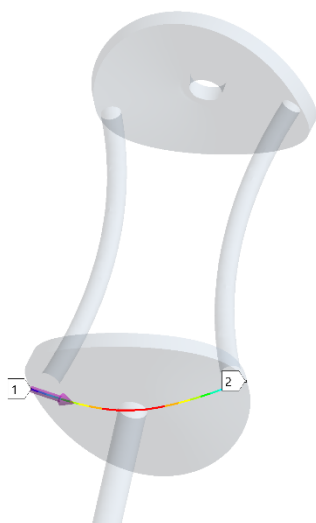


Slika 17. Vrijednosti naprezanja u modelu sa dva kraka

Pomaci u donjoj ploči prikazani su na slici 18.

A: 2 kraka  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
11/27/2016 5:58 PM

0.043265 Max  
0.040613  
0.037961  
0.035309  
0.032657  
0.030005  
0.027353  
0.024701  
0.022049  
0.019396 Min



Slika 18. Pomaci u donjoj ploči modela sa dva kraka

Pomaci u gornjoj ploči prikazani su na slici 19.

A: 2 kraka  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
11/27/2016 5:58 PM

0.022504 Max  
0.020103  
0.017703  
0.015303  
0.012902  
0.010502  
0.0081015  
0.0057011  
0.0033007  
0.00090037 Min

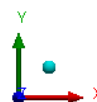


Slika 19. Pomaci u gornjoj ploči modela sa dva kraka

Za model sa tri kraka proračun je sličan te u nastavku su dane samo grafičke reprezentacije rezultata.

**B: 3 kraka**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1  
 11/27/2016 5:59 PM

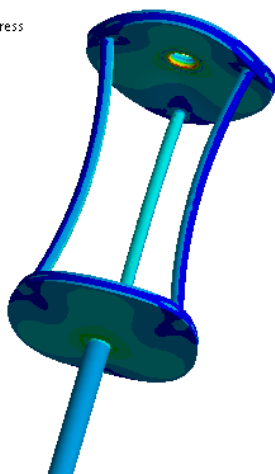
**0.043428 Max**  
 0.038606  
 0.033784  
 0.028962  
 0.024139  
 0.019317  
 0.014495  
 0.0096728  
 0.0048506  
**2.8338e-5 Min**



**Slika 20. Ukupni pomaci modela sa tri kraka**

**B: 3 kraka**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 11/27/2016 5:59 PM

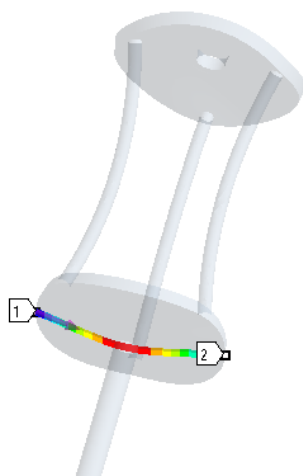
**23.762 Max**  
 21.127  
 18.491  
 15.856  
 13.22  
 10.585  
 7.9492  
 5.3136  
 2.6781  
**0.042572 Min**



**Slika 21. Raspored naprezanja modela sa tri kraka**

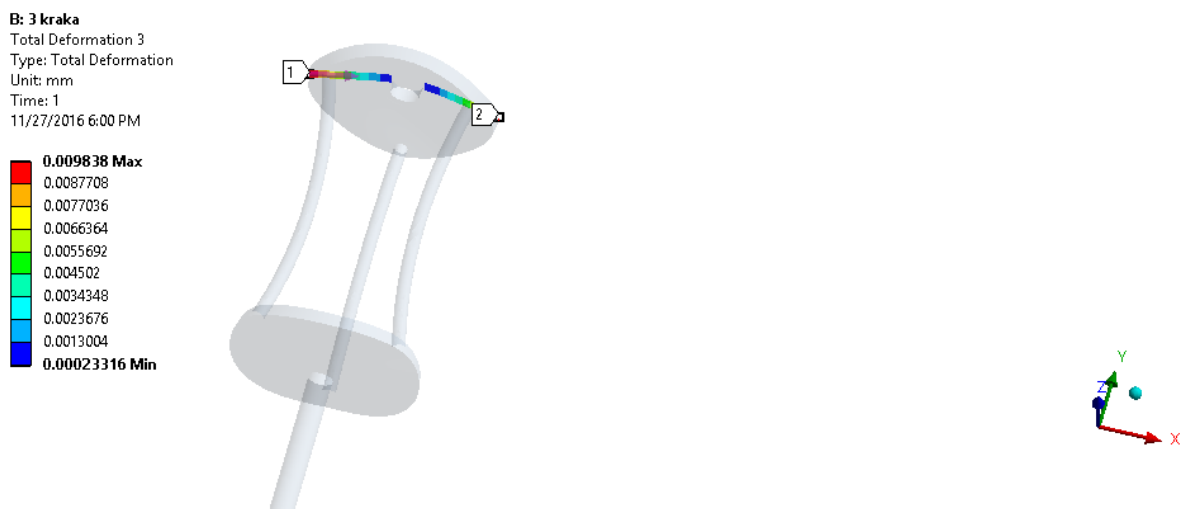
**B: 3 kraka**  
 Total Deformation 2  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1  
 11/27/2016 6:00 PM

**0.027172 Max**  
 0.026015  
 0.024859  
 0.023702  
 0.022545  
 0.021389  
 0.020232  
 0.019075  
 0.017919  
**0.016762 Min**



**Slika 22. Pomaci u donjoj ploči modela sa tri kraka**

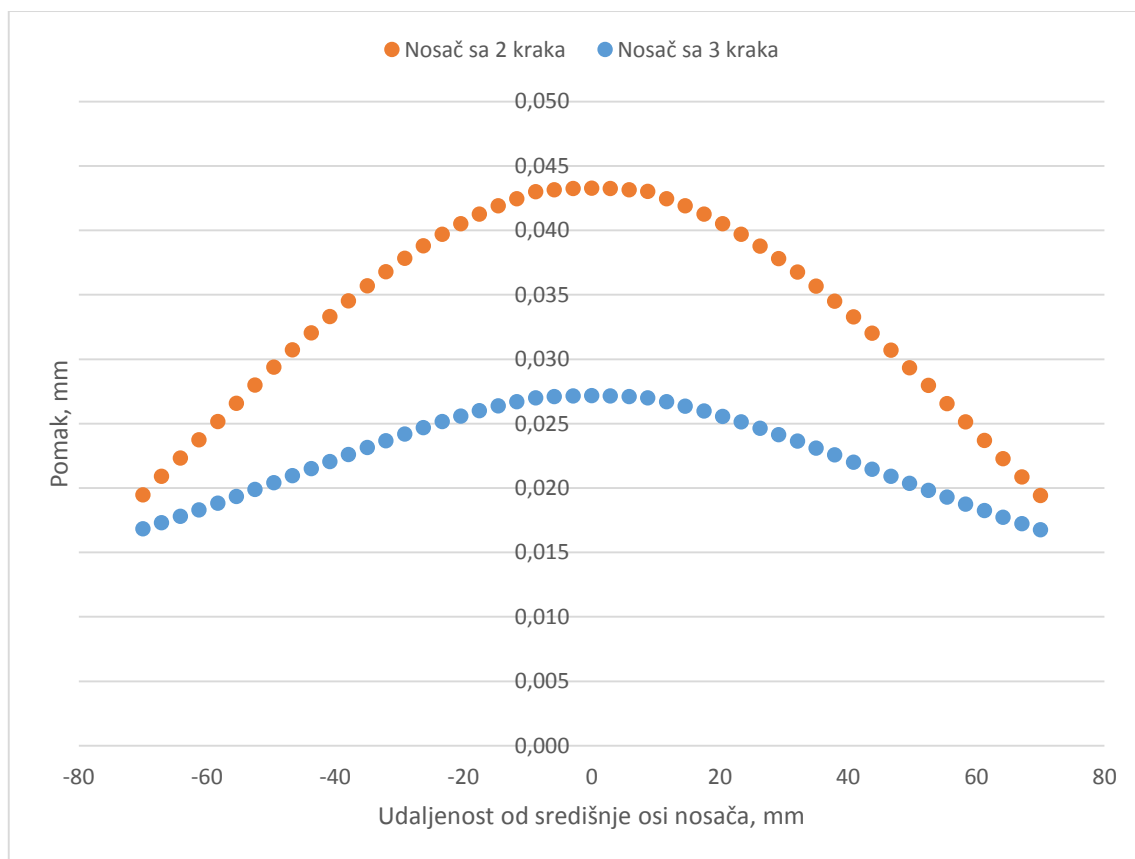




Slika 23. Pomaci u gornjoj ploči modela sa tri kraka

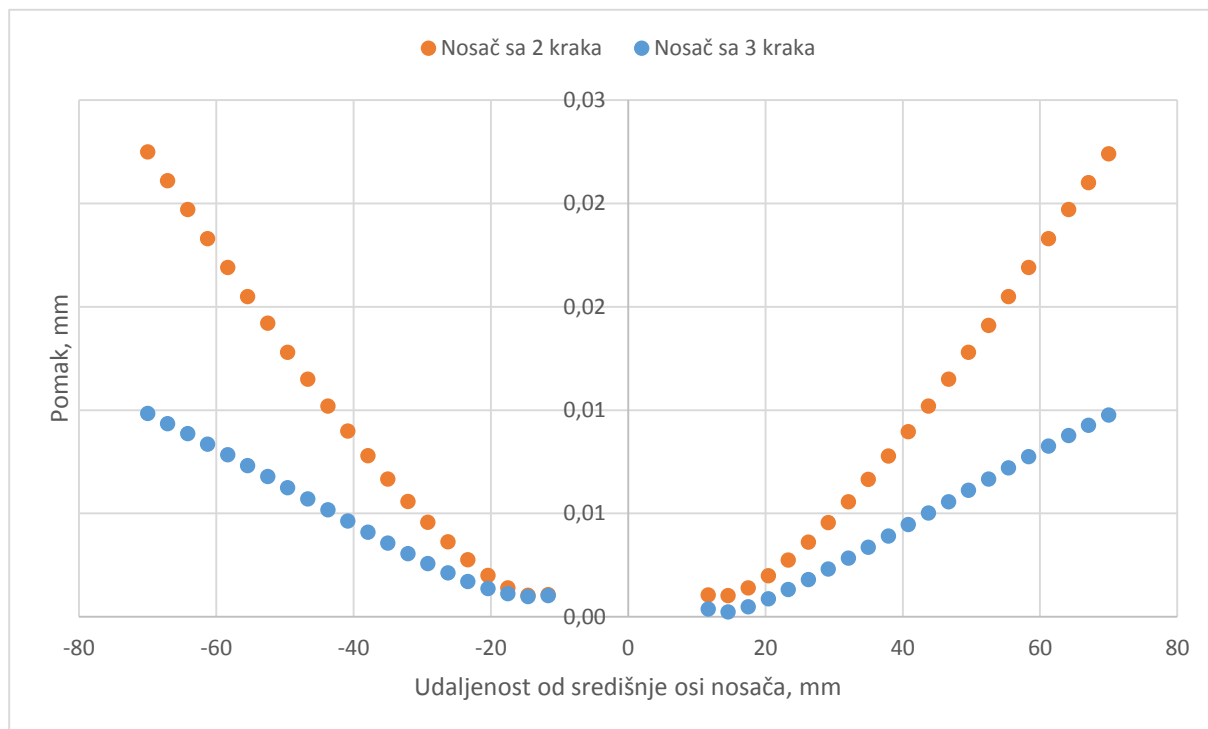
#### 4.3. Usporedba mogućih rješenja okvira nosača utega sile

Pomoću software-skog paketa Ansys u mogućnosti smo dobiti podatke o rasporedu pomaka po presjeku modela. Presjeci koji najviše utječu na dimenzijsku postojanost mjerne konstrukcije su presjeci gornje i donje ploče nosača, prikazani slikama 18, 19, 22 i 23.



Slika 24. Usporedba pomaka u donjoj ploči nosača

Na slici 24 možemo vidjeti kako se iznosi pomaka za donju ploču nosača rastu u smjeru od oboda donje ploče nosača prema središtu donje ploče nosača. Također možemo primijetiti kako su za model nosača sa 2 kraka pomaci veći nego kod modela sa 3 kraka, i to duž cijelog nosača.



**Slika 25. Usporedba pomaka u gornjoj ploči nosača**

Na slici 25 možemo vidjeti kako se iznosi pomaka za gornju ploču nosača rastu u smjeru od središta gornje ploče nosača prema obodu gornje ploče nosača. Valja primijetiti kako vrijednosti pomaka u neposrednoj blizini središnje osi nosača nema vrijednosti pomaka zbog toga što se tamo nalazi provrt. Također možemo primijetiti kako su za model nosača sa 2 kraka pomaci veći nego kod modela sa 3 kraka, i to duž cijelog nosača, zanemarujući provrt.

Sukladno tome možemo zaključiti kako model nosača sa 3 kraka ima bolju dimenzijsku stabilnost gornje i donje ploče nosača od onog sa 2 kraka, stoga je nosač sa 3 kraka povoljnije rješenje za izradu nosača.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Prema provedenoj analizi iz poglavlja 4 odabran je kao povoljnije rješenje nosač sa tri kraka te je u konačnosti i izrađen. Za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada osmišljeno je provođenje sljedećih radnji:

- Umjeravanje okvira nosača sa tri kraka kao i svih ostalih utega koji će se koristiti na etalonu sile nazivne vrijednosti 1 kN. Svi utezi su prilagođeni kako bi se postigle određene mase koje će uz postojeće ubrzanje sile teže u laboratoriju ostvariti pojedinu vrijednost sile
- Umjeravanje prijenosnih etalona sile nazivne sile 200 N i 500 N u Tübitak umjernom laboratoriju
- Umjeravanje prijenosnih etalona sile nazivne sile 200 N i 500 N u etalonu sile 1 kN
- Obrada i analiza dobivenih rezultata

### 5.1. Umjeravanje okvira nosača sa tri kraka i utega etalona sile 1 kN

S obzirom kako nisu svi utezi završeni odnosno njihovo podešavanje mase nije odgovarajuće za okvir nosača sa tri kraka, odlučeno je da se provede umjeravanje samo utega za nazivne sile 200 N i 500 N.

Sila se po definiciji može izraziti kao masa  $\times$  ubrzanje zemljine sile teže. Ubrzanje zemljine sile teže je određeno na mjestu instalacije referentnog etalona sile 1 kN.

Za provedbu gravimetrijskih mjerenja primijenjen je relativni gravimetar CG-3M AutoGrav kanadske tvrtke Scintrex, koji je trenutno jedan od najsuvremenijih relativnih gravimetra (slika 26). To je kvareni, mikroprocesorski kontroliran i visoko automatiziran instrument. Radni domet gravimetra je preko 7000  $\mu\text{Gal}$ -a ( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ), što obuhvaća područje cijele Zemlje, bez potrebe za resetiranjem, a standardna rezolucija gravimetra je 1  $\mu\text{Gal}$ -a ( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ). Mjerenje gravimetrom Scintrex CG-5 se obavlja automatski te se na taj način eliminira pogreška procjene mjeritelja, a podaci mjerenja se pohranjuju u memoriju gravimetra.



**Slika 26. Relativni gravimetar Scintrex CG-5 i njegovo sučelje [9]**

Obradom rezultata dobivena je vrijednost ubrzanja sile teže na mjestu instalacije referentnog etalona sile 1 kN od  $g = 9,80663337 \pm 1,82 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$  gdje je nesigurnost mjerenja izražena preko standardne devijacije [9].

Umjeravanje utega je provedeno u Nacionalnom umjernom laboratoriju za masu i gustoću (LMG) Hrvatskog mjeriteljskog instituta na mjernom komparatoru K 50-2/P proizvođača Käefer, mjerne nesigurnosti od 53,8 mg. Rezultati umjeravanja su prikazani u tablici 4.

**Tablica 4. Rezultati umjeravanja utega sile**

Oznaka	Konvencionalna masa, mg	Mjerna nesigurnost, mg
50 N-1	5.098.462	
50 N-2	5.098.865	
50 N-3	5.097.957	
50 N-4	5.097.917	
50 N-5	5.097.870	
50 N-6	5.098.567	
50 N-7	5.099.063	

50 N-8	5.099.030	53,8
50 N-9	5.098.850	
20 N-1	2.040.040	
20 N-2	2.040.003	
20 N-3	2.040.070	
20 N-4	2.040.245	
20 N-5	2.039.940	
20 N-6	2.040.198	
20 N-7	2.040.103	
20 N-8	2.040.097	
20 N-9	2.040.265	
nosač 10 N	1.019.880	
nosač 10 N-0	1.020.052	

## 5.2. Umjeravanje u Tübitak umjernom laboratoriju

Ispitivanje je provedeno na primarnim etalonima sile nazivne vrijednosti 200 N i 600 N te mjerne sposobnosti 0,002 %. Na slici 27 prikazani su korišteni primarni etaloni.



Slika 27. Primarni etaloni sile u Tübitak umjernom laboratoriju

Umjeravanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 376 a procedura je opisana u poglavlju 3.

### 5.2.1. Rezultati umeravanja prijenosnog etalona sile Z30A 200 N

U narednim tablicama prikazani su sirovi rezultati umjeravanja te zatim i obrađeni rezultati na prijenosnom etalonu tipa Z30A za pojedine parametre sukladno postupku opisanom u poglavlju 3.3. ovog rada.

**Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6'**

<b><i>F</i>, kN</b>	<b>R1 0°</b>	<b>R2 0°</b>	<b>R3 120°</b>	<b>R4'</b>	<b>R5 240°</b>	<b>R6'</b>
<b>20</b>	-0,19985	-0,19988	-0,19989	-0,19996	-0,19988	-0,19992
<b>40</b>	-0,39974	-0,39978	-0,39982	-0,39987	-0,39981	-0,39983
<b>60</b>	-0,59964	-0,59970	-0,59974	-0,59978	-0,59973	-0,59975
<b>80</b>	-0,79953	-0,79960	-0,79966	-0,79968	-0,79965	-0,79966
<b>100</b>	-0,9942	-0,99950	-0,99957	-0,99960	-0,99957	-0,99958
<b>120</b>	-1,19932	-1,19940	-1,19949	-1,19951	-1,19949	-1,19949
<b>140</b>	-1,39920	-1,39930	-1,39939	-1,39941	-1,39939	-1,39939
<b>160</b>	-1,59908	-1,59919	-1,59930	-1,59931	-1,59929	-1,59929
<b>180</b>	-1,79896	-1,79906	-1,79920	-1,79921	-1,79941	-1,79919
<b>200</b>	-1,99882	-1,99895	-1,99910	-	-1,99909	-

**Tablica 6. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja**

	<b>0° I</b>	<b>0° II</b>	<b>0° III</b>	<b>120°</b>	<b>240°</b>
<b><i>i</i><sub>0</sub>, mV/V</b>	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
<b><i>X</i><sub>N</sub>, mV/V</b>	-1,199879	-1,99881	-1,99880	-1,99900	-1,99910
<b><i>i</i><sub>f</sub>, mV/V</b>	0,00004	0,00004	-0,00001	-0,00002	-0,00000

$f_0, \%$	-0,002	-0,002	0,001	0,001	0,000
-----------	--------	--------	-------	-------	-------

Tablica 7. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima

	<b>R1</b> <b>0°</b>	<b>R2</b> <b>0°</b>	<b>R3 / R4'</b> <b>120°</b>	<b>R5 / R6'</b> <b>240°</b>
$i_f, \text{mV/V}$	0,00002	-0,00001	-0,00008	-0,00002
$f_0, \%$	-0,001	0,0005	0,004	0,001

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja

	<b>Na nazivnoj sili</b> <b>240°</b>	<b>Nakon rasterećenja s nazivne sile</b> <b>240°</b>
$i_0, \text{mV/V}$	0,00000	0,00000
$i_{30}, \text{mV/V}$	-0,09420	-0,09422
$i_{300}, \text{mV/V}$	-0,09422	-0,09422
$c, \%$	0,001	0,005

Tablica 9. Izračunate vrijednosti pogrešaka

$F_i$	<b>R1 i R2</b> <b>0°</b>		<b>R1, R3 i R5</b> <b>0°, 120° i 240°</b>				
<b>kN</b>	$X_{wr}$ mV/V	$b'$ %	$X_r$ mV/V	$b$ %	$X_a$ mV/V	$f_c$ %	$\nu$ %
<b>20</b>	-0,199873	0,015	-0,199865	0,020	-0,199889	-0,008	0,028
<b>40</b>	-0,399790	0,010	-0,399760	0,020	-0,399788	0,000	0,009
<b>60</b>	-0,599703	0,010	-0,599670	0,017	-0,599695	0,001	0,005
<b>80</b>	-0,799613	0,009	-0,799565	0,016	-0,799606	0,001	0,002
<b>100</b>	-0,999520	0,008	-0,999460	0,015	-0,999520	0,000	0,002
<b>120</b>	-1,199433	0,007	-1,199360	0,014	-1,199433	0,000	0,001

<b>140</b>	-1,399327	0,007	-1,399250	0,014	-1,199343	-0,001	0,001
<b>160</b>	-1,599223	0,007	-1,599135	0,014	-1,599246	-0,001	0,000
<b>180</b>	-1,799191	0,006	-1,799010	0,025	-1,799141	0,003	0,006
<b>200</b>	-1,999003	0,007	-1,998885	0,014	-1,999024	-0,001	-

**Tablica 10. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja**

Opterećenje – vlak kN	Klasa*	Najmanja Proširena mjerna nesigurnost, W uz $k=2$ i $P=95$ % %	
		Rastuće sile	Rastuće/padajuće sile
<b>20</b>	00	0,028	0,043
<b>40</b>	00	0,020	0,022
<b>60</b>	00	0,019	0,020
<b>80</b>	00	0,018	0,018
<b>100</b>	00	0,017	0,017
<b>120</b>	00	0,016	0,016
<b>140</b>	00	0,016	0,016
<b>160</b>	00	0,016	0,016
<b>180</b>	00	0,020	0,021
<b>200</b>	00	0,016	0,016

\*Napomena – klasifikacija provedena bez proširene mjerne nesigurnosti

Izračunata interpolirana krivulja za vrijednosti sile ima oblik  $F_a = a_4X + b_4X^2 + c_4X^3$ , a vrijednosti koeficijenata iznose:

- $a_4 = 1,0058613 \times 10^2$
- $b_4 = -1,63039505 \times 10^{-2}$
- $c_4 = -5,71180458 \times 10^{-3}$



**5.2.2. Rezultati umeravanja prijenosnog etalona sile U1 500 N**

U narednim tablicama prikazani su sirovi rezultati umjeravanja te zatim i obrađeni rezultati na prijenosnom etalonu tipa U1 za pojedine parametre sukladno postupku opisanom u poglavlju 3.3. ovog rada.

**Tablica 11. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6'**

<b><i>F</i>, kN</b>	<b>R1 0°</b>	<b>R2 0°</b>	<b>R3 120°</b>	<b>R4'</b>	<b>R5 240°</b>	<b>R6'</b>
<b>50</b>	-0,20403	-0,20398	-0,20399	-0,20411	-0,20398	-0,20410
<b>100</b>	-0,40800	-0,40799	-0,40801	-0,40813	-0,40797	-0,40809
<b>150</b>	-0,61200	-0,61202	-0,61208	-0,61219	-0,61195	-0,61206
<b>200</b>	-0,81599	-0,81603	-0,81603	-0,81617	-0,81593	-0,81607
<b>250</b>	-1,02005	-1,02006	-1,01983	-1,02011	-1,01991	-1,02019
<b>300</b>	-1,22396	-1,22409	-1,22392	-1,22410	-1,22407	-1,22430
<b>350</b>	-1,42797	-1,42808	-1,42782	-1,42809	-1,42815	-1,42838
<b>400</b>	-1,63191	-1,63213	-1,63187	-1,63610	-1,63229	-1,63245
<b>450</b>	-1,83597	-1,83617	-1,83600	-1,83610	-1,83642	-1,83651
<b>500</b>	-2,04004	-2,04003	-2,03985	-	-2,04051	-

**Tablica 12. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja**

	<b>0° I</b>	<b>0° II</b>	<b>0° III</b>	<b>120°</b>	<b>240°</b>
<b><i>i</i><sub>0</sub>, mV/V</b>	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
<b><i>X</i><sub>N</sub>, mV/V</b>	-2,04073	-2,03970	-2,03956	-2,03956	-2,04014
<b><i>i</i><sub>t</sub>, mV/V</b>	-0,00023	-0,00009	0,00000	0,00010	-0,00011
<b><i>f</i><sub>0</sub>, %</b>	0,011	0,004	0,000	-0,005	0,005

**Tablica 13. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima**

	<b>R1</b> <b>0°</b>	<b>R2</b> <b>0°</b>	<b>R3 / R4'</b> <b>120°</b>	<b>R5 / R6'</b> <b>240°</b>
$i_t$ , mV/V	-0,00009	-0,00008	-0,00016	-0,00017
$f_0$ , %	0,004	0,004	0,008	0,008

**Tablica 14. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja**

	<b>Na nazivnoj sili</b> <b>240°</b>	<b>Nakon rasterećenja s nazivne sile</b> <b>240°</b>
$i_0$ , mV/V	0,00000	0,00000
$i_{30}$ , mV/V	-2,04005	-0,09037
$i_{300}$ , mV/V	-2,04019	-0,09026
$c$ , %	0,007	0,005

**Tablica 15. Izračunate vrijednosti pogrešaka**

$F_i$	<b>R1 i R2</b> <b>0°</b>		<b>R1, R3 i R5</b> <b>0°, 120° i 240°</b>				
<b>kN</b>	$X_{wr}$ <b>mV/V</b>	$b'$ <b>%</b>	$X_r$ <b>mV/V</b>	$b$ <b>%</b>	$X_a$ <b>mV/V</b>	$f_c$ <b>%</b>	$\nu$ <b>%</b>
<b>50</b>	-0,204005	0,025	-0,204000	0,025	-0,204001	0,000	0,059
<b>100</b>	-0,407995	0,002	-0,407993	0,010	-0,407994	0,000	0,029
<b>150</b>	-0,612010	0,003	-0,612010	0,021	-0,611984	0,004	0,018
<b>200</b>	-0,816010	0,005	-0,815983	0,012	-0,815975	0,001	0,017
<b>250</b>	-1,020055	0,001	-1,019930	0,022	-1,019971	-0,004	0,027
<b>300</b>	-1,224025	0,011	-1,223983	0,012	-1,223976	0,001	0,017
<b>350</b>	-1,428025	0,008	-1,427980	0,023	-1,427993	-0,001	0,018
<b>400</b>	-1,632020	0,013	-1,632023	0,026	-1,632027	0,000	0,135
<b>450</b>	-1,836070	0,011	-1,836130	0,025	-1,836081	0,003	0,005

<b>500</b>	-2,040035	0,000	-2,040133	0,032	-2,040160	-0,001	-
------------	-----------	-------	-----------	-------	-----------	--------	---

Tablica 16. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja

Opterećenje – vlak kN	Klasa*	Proširena mjerna nesigurnost, $W$ uz $k=2$ i $P=95\%$ %	
		Rastuće sile	Rastuće/padajuće sile
<b>50</b>	00	0,034	0,076
<b>100</b>	00	0,013	0,036
<b>150</b>	00	0,019	0,027
<b>200</b>	00	0,014	0,024
<b>250</b>	00	0,019	0,036
<b>300</b>	00	0,018	0,026
<b>350</b>	00	0,020	0,027
<b>400</b>	00	0,025	0,157
<b>450</b>	00	0,024	0,024
<b>500</b>	00	0,022	0,021

\*Napomena – klasifikacija provedena bez proširene mjerne nesigurnosti

Izračunata interpolirana krivulja za vrijednosti sile ima oblik  $F_a = a_4X + b_4X^2 + c_4X^3$ , a vrijednosti koeficijenata iznose:

- $a_4 = -2,45091577 \times 10^2$
- $b_4 = 3,26057218 \times 10^{-2}$
- $c_4 = 1,906062 \times 10^{-2}$

### 5.3. Umjeravanje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava

Umjeravanje je provedeno pomoću umjerenih utega i trokrakog nosača na referentnom etalonu sile nazivne vrijednosti 1 kN. Mjerna sposobnost je procijenjena na 0,05 % s obzirom da se radi o preliminarnim rezultatima te nije provedeno ispitivanje cijele skale referentnog etalona.

#### 5.3.1. Rezultati umeravanja prijenosnog etalona sile Z30A 200 N

U narednim tablicama prikazani su sirovi rezultati umjeravanja te zatim i obrađeni rezultati na prijenosnom etalonu tipa Z30A za pojedine parametre sukladno postupku opisanom u poglavlju 3.3. ovog rada.

**Tablica 17.** Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6'

<b><i>F</i>, kN</b>	<b>R1 0°</b>	<b>R2 0°</b>	<b>R3 120°</b>	<b>R4'</b>	<b>R5 240°</b>	<b>R6'</b>
<b>20</b>	-0,199899	-0,199908	-0,199912	-0,199932	-0,199904	-0,199928
<b>40</b>	-0,399823	-0,399821	-0,399821	-0,399854	-0,399818	-0,399839
<b>60</b>	-0,599738	-0,599726	-0,599747	-0,599764	-0,599719	-0,599741
<b>80</b>	-0,799661	-0,799638	-0,799663	-0,799689	-0,799637	-0,799658
<b>100</b>	-0,999589	-0,999574	-0,999605	-0,999624	-0,999563	-0,999587
<b>120</b>	-1,199498	-1,199478	-1,199505	-1,199524	-1,199437	-1,199458
<b>140</b>	-1,399389	-1,399384	-1,399414	-1,399436	-1,399354	-1,399374
<b>160</b>	-1,599295	-1,599276	-1,599348	-1,599334	-1,599249	-1,599273
<b>180</b>	-1,799159	-1,799167	-1,799240	-1,799234	-1,799146	-1,799152
<b>200</b>	-1,999113	-1,999059	-1,999157	-	-1,999024	-

Tablica 18. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja

	0° I	0° I	0° III	120°	240°
$i_0$ , mV/V	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
$X_N$ , mV/V	-1,999074	-1,999067	-1,999082	-1,999156	-1,999017
$i_t$ , mV/V	-0,000013	-0,000009	-0,000011	-0,000021	-0,000015
$f_0$ , %	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001

Tablica 19. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima

	R1 0°	R2 0°	R3 / R4' 120°	R5 / R6' 240°
$i_t$ , mV/V	-0,000002	-0,000002	-0,000002	-0,000002
$f_0$ , %	0,001	0,001	0,001	0,001

Tablica 20. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja

	Na nazivnoj sili	Nakon rasterećenja s nazivne sile
$i_0$ , mV/V	0,00000	0,00000
$i_{30}$ , mV/V	-1,99900	-0,00003
$i_{300}$ , mV/V	-1,99902	-0,00001
$c$ , %	0,001	0,001

Tablica 21. Izračunate vrijednosti pogrešaka

$F_i$	R1 i R2 0°, 120° i 240°		R1, R3 i R5 0°, 120° i 240°				
	$X_{wr}$ mV/V	$b'$ %	$X_r$ mV/V	$b$ %	$X_a$ mV/V	$f_c$ %	$\nu$ %
20	-0,199904	0,005	-0,199905	0,007	-0,199911	-0,003	0,011
40	-0,399822	0,001	-0,399821	0,001	-0,399824	-0,001	0,007

<b>60</b>	-0,599732	0,002	-0,599735	0,005	-0,599739	-0,001	0,003
<b>80</b>	-0,799650	0,003	-0,799654	0,003	-0,799654	0,000	0,003
<b>100</b>	-0,999582	0,002	-0,999586	0,004	-0,999568	0,002	0,002
<b>120</b>	-1,199488	0,002	-1,199480	0,006	-1,199481	0,000	0,002
<b>140</b>	-1,399387	0,000	-1,399386	0,004	-1,399390	0,000	0,002
<b>160</b>	-1,599286	0,001	-1,599297	0,006	-1,599295	0,000	0,001
<b>180</b>	-1,799163	0,000	-1,799182	0,005	-1,799195	-0,001	0,000
<b>200</b>	-1,999086	0,003	-1,999098	0,007	-1,999089	0,000	-

Tablica 22. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja

Opterećenje – vlak kN	Klasa*	Proširena mjerna nesigurnost, $W$ uz $k=2$ i $P=95\%$ , %	
		Rastuće sile	Rastuće/padajuće sile
<b>20</b>	00	0,051	0,052
<b>40</b>	00	0,050	0,051
<b>60</b>	00	0,050	0,050
<b>80</b>	00	0,050	0,050
<b>100</b>	00	0,050	0,050
<b>120</b>	00	0,050	0,050
<b>140</b>	00	0,050	0,050
<b>160</b>	00	0,050	0,050
<b>180</b>	00	0,050	0,050
<b>200</b>	00	0,050	0,050

\*Napomena – klasifikacija provedena bez proširene mjerne nesigurnosti

Izračunata interpolirana krivulja za vrijednosti sile ima oblik  $F_a = a_4X + b_4X^2 + c_4X^3$ ,  
a vrijednosti koeficijenata iznose:

- $a_4 = -1,00045301 \times 10^2$
- $b_4 = -4,39187848 \times 10^{-3}$
- $c_4 = -2,26150864 \times 10^{-3}$

### 5.3.2. Rezultati umeravanja prijenosnog etalona sile U1 500 N

U narednim tablicama prikazani su sirovi rezultati umjeravanja te zatim i obrađeni rezultati na prijenosnom etalonu tipa U1 za pojedine parametre sukladno postupku opisanom u poglavlju 3.3. ovog rada.

**Tablica 23.** Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima R1, R2, R3, R5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima R4', R6'

<b><i>F</i>, kN</b>	<b>R1 0°</b>	<b>R2 0°</b>	<b>R3 120°</b>	<b>R4'</b>	<b>R5 240°</b>	<b>R6'</b>
<b>50</b>	-0,204037	-0,204031	-0,204017	-0,204165	-0,203998	-0,204159
<b>100</b>	-0,408042	-0,408030	-0,407961	-0,408135	-0,408013	-0,408155
<b>150</b>	-0,612025	-0,611986	-0,611892	-0,612112	-0,611960	-0,612130
<b>200</b>	-0,816016	-0,816017	-0,815913	-0,816145	-0,815924	-0,816153
<b>250</b>	-1,019920	-1,020040	-1,019876	-1,020174	-1,019908	-1,020053
<b>300</b>	-1,224077	-1,224047	-1,223875	-1,224148	-1,223911	-1,224045
<b>350</b>	-1,428174	-1,428195	-1,427898	-1,428118	-1,427958	-1,428138
<b>400</b>	-1,632264	-1,632168	-1,631973	-1,632116	-1,632060	-1,632150
<b>450</b>	-1,836371	-1,836284	-1,835963	-1,836094	-1,836095	-1,836153
<b>500</b>	-2,040376	-2,040445	-2,039977	-	-2,040132	-

**Tablica 24.** Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja

	<b>0° I</b>	<b>0° II</b>	<b>0° III</b>	<b>120°</b>	<b>240°</b>
<b><i>i</i><sub>0</sub>, mV/V</b>	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
<b><i>X</i><sub>N</sub>, mV/V</b>	-2,040332	-2,040321	-2,040535	-2,040033	-2,040032
<b><i>i</i><sub>f</sub>, mV/V</b>	-0,000173	-0,000108	-0,000094	-0,000002	-0,000068

$f_0, \%$	0,008	0,005	0,005	0,000	0,003
-----------	-------	-------	-------	-------	-------

Tablica 25. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima

	<b>R1</b> <b>0°</b>	<b>R2</b> <b>0°</b>	<b>R3 / R4'</b> <b>120°</b>	<b>R5 / R6'</b> <b>240°</b>
$i_t, \text{mV/V}$	-0,00013	-0,00012	-0,00009	-0,00010
$f_0, \%$	0,006	0,006	0,004	0,005

Tablica 26. Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja

	<b>Na nazivnoj sili</b> <b>240°</b>	<b>Nakon rasterećenja s nazivne sile</b> <b>240°</b>
$i_0, \text{mV/V}$	0,00000	0,00000
$i_{30}, \text{mV/V}$	-2,04005	-0,00017
$i_{300}, \text{mV/V}$	-2,04019	-0,00004
$c, \%$	0,007	0,006

Tablica 27. Izračunate vrijednosti pogrešaka

$F_i$	<b>R1 i R2</b> <b>0°</b>		<b>R1, R3 i R5</b> <b>0°, 120° i 240°</b>				
<b>kN</b>	$X_{wr}$ mV/V	$b'$ %	$X_r$ mV/V	$b$ %	$X_a$ mV/V	$f_c$ %	$\nu$ %
<b>50</b>	-0,204034	0,003	-0,204017	0,019	-0,203983	0,017	0,076
<b>100</b>	-0,408036	0,003	-0,408005	0,020	-0,407968	0,009	0,039
<b>150</b>	-0,612006	0,006	-0,611959	0,022	-0,611958	0,000	0,032
<b>200</b>	-0,816017	0,000	-0,815951	0,013	-0,815954	0,000	0,028
<b>250</b>	-1,019980	0,012	-1,019901	0,004	-1,019960	-0,006	0,022
<b>300</b>	-1,224062	0,002	-1,223954	0,017	-1,223976	-0,002	0,017
<b>350</b>	-1,428185	0,001	-1,428010	0,019	-1,428006	0,000	0,014



<b>400</b>	-1,632216	0,006	-1,632099	0,018	-1,632051	0,003	0,007
<b>450</b>	-1,836328	0,005	-1,836143	0,022	-1,836114	0,002	0,005
<b>500</b>	-2,040411	0,003	-2,040162	0,020	-2,040197	-0,002	-

Tablica 28. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja

Opterećenje – vlak kN	Klasa*	Proširena mjerna nesigurnost, $W$ uz $k=2$ i $P=95\%$ , %	
		Rastuće sile	Rastuće/padajuće sile
<b>50</b>	0,5	0,064	0,108
<b>100</b>	00	0,063	0,103
<b>150</b>	00	0,062	0,097
<b>200</b>	00	0,061	0,091
<b>250</b>	00	0,060	0,085
<b>300</b>	00	0,059	0,079
<b>350</b>	00	0,058	0,073
<b>400</b>	00	0,057	0,067
<b>450</b>	00	0,056	0,061
<b>500</b>	00	0,055	0,055

\*Napomena – klasifikacija provedena bez proširene mjerne nesigurnosti

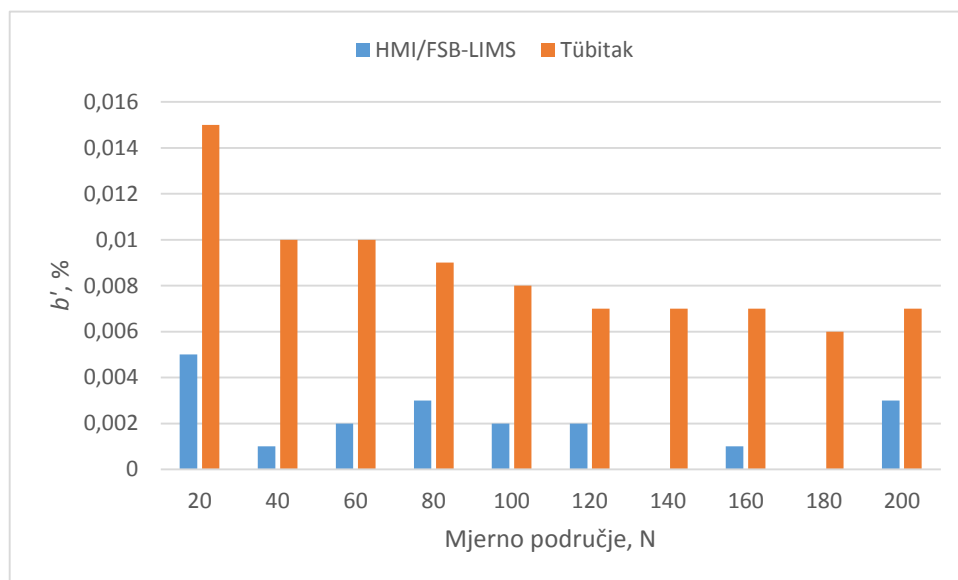
Izračunata interpolirana krivulja za vrijednosti sile ima oblik  $F_a = a_4X + b_4X^2 + c_4X^3$ , a vrijednosti koeficijenata iznose:

- $a_4 = -2,45119128 \times 10^2$
- $b_4 = -3,40847611 \times 10^{-4}$
- $c_4 = 1,05857851 \times 10^{-2}$

## 6. ANALIZA REZULTATA

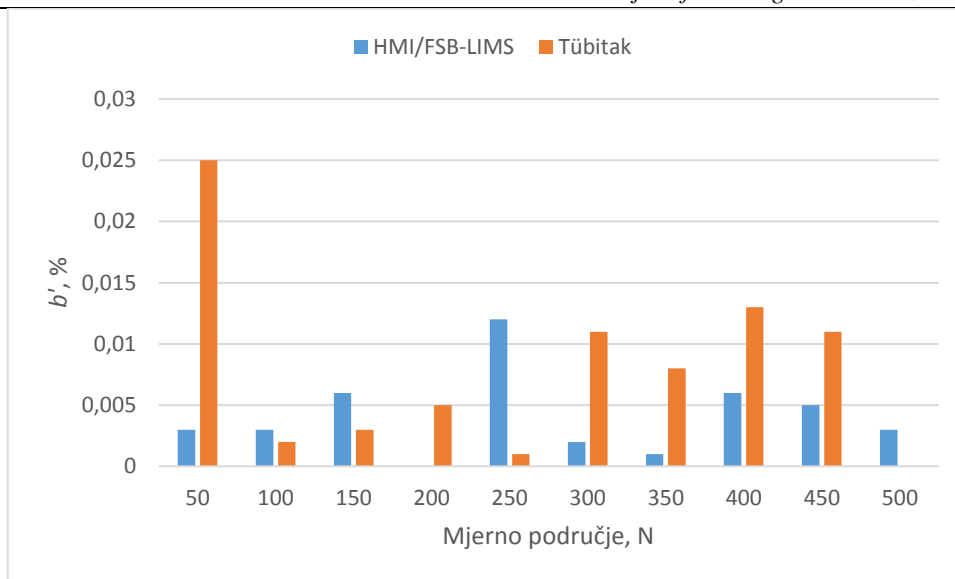
Na temelju dobivenih rezultata provedena je kvalitativna usporedba dvaju laboratorija, HMS/FSB-LIMS, Zagreb i Nacionalnog metrološkog instituta Tübitak, Istanbul. Uspoređivane su vrijednosti dobivene umjeravanjem prijenosnih etalona sile Z30A nazivnog mjernog područja 200 N i U1 nazivnog mjernog područja 500 N.

Na slici 28 prikazana je relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije  $b'$  po mjernom području prijenosnog etalona Z30A uspoređivanih laboratorija. Kod ponovljivosti nešto bolje rezultate ima HMS/FSB-LIMS no ako se uzme u obzir dozvoljena pogreška za klasu 00, koja mora biti manja od 0,025 % može se konstatirati da oba laboratorija imaju veoma dobre rezultate.



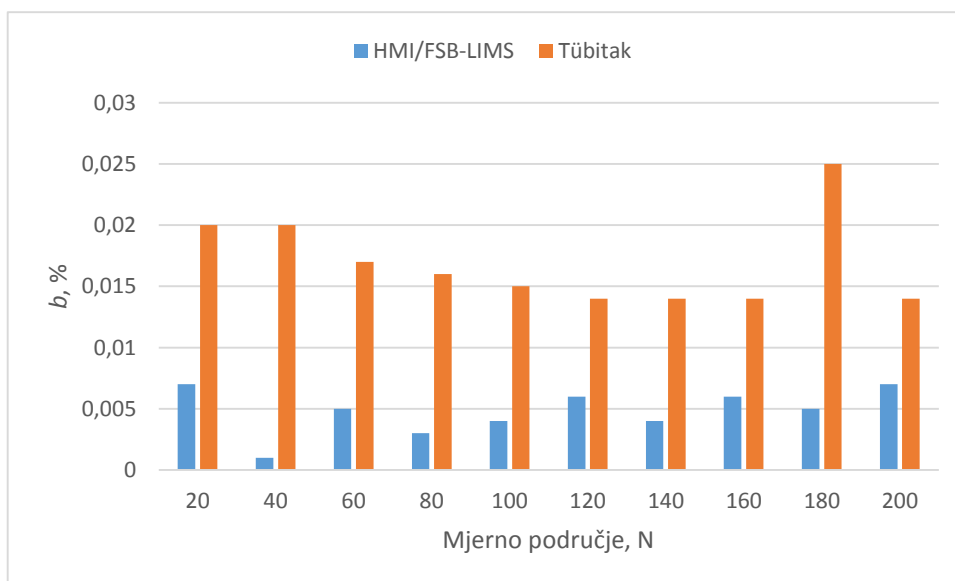
**Slika 28. Vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije  $b'$  uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A**

Na slici 29 prikazana je relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije  $b'$  po mjernom području prijenosnog etalona U1 uspoređivanih laboratorija. Uočljiva je dosta velika pogreška na prvoj točki od 50 N za laboratorij Tübitak, no na sljedećim mjernim točkama je pogreška podjednaka.



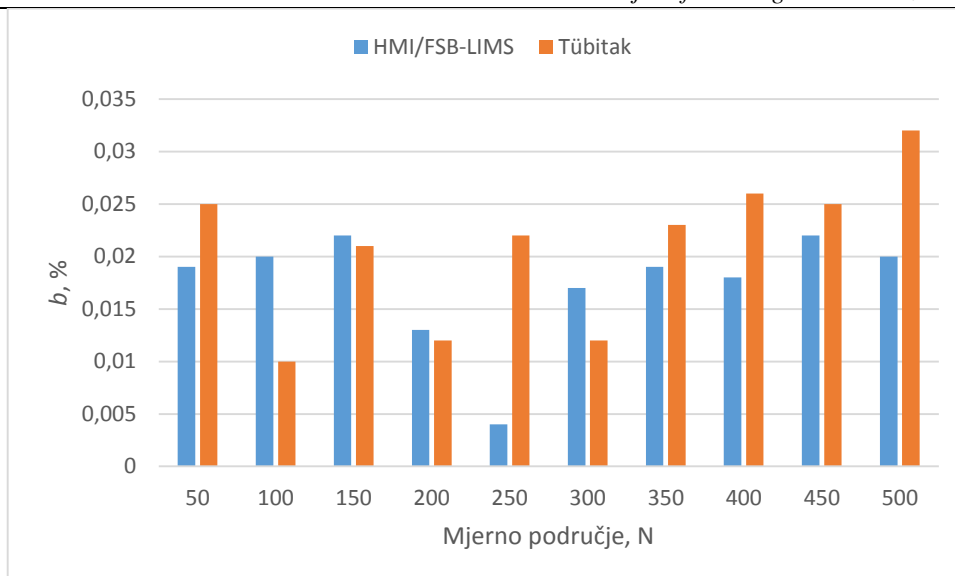
**Slika 29. Vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije  $b'$  uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1**

Na slici 30 prikazana je relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom  $b$  po mjernom području dinamometra Z30A uspoređivanih laboratorija.



**Slika 30. Vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom  $b$  uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A**

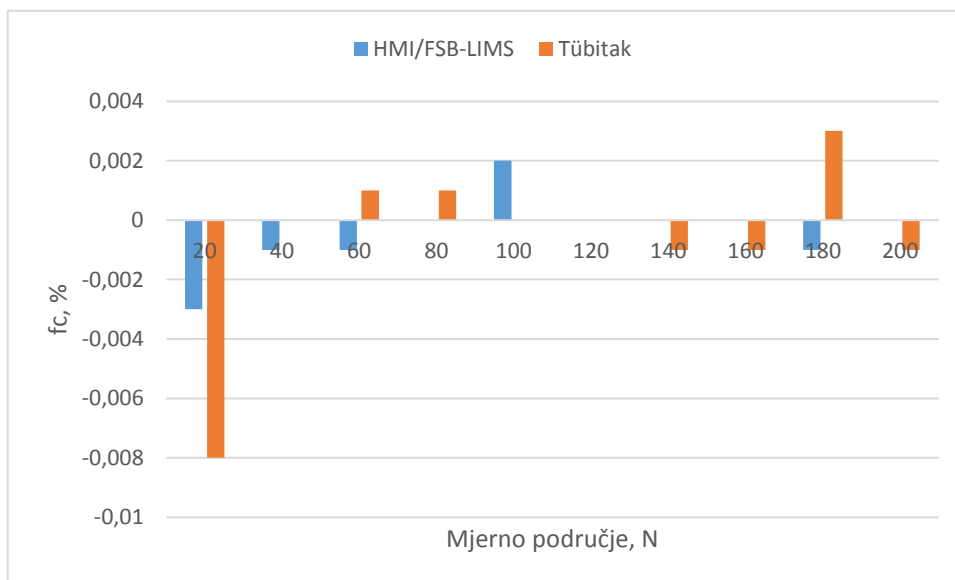
Na slici 31 prikazana je relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom  $b$  po mjernom području dinamometra U1 uspoređivanih laboratorija.



**Slika 31. Vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom  $b$  uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1**

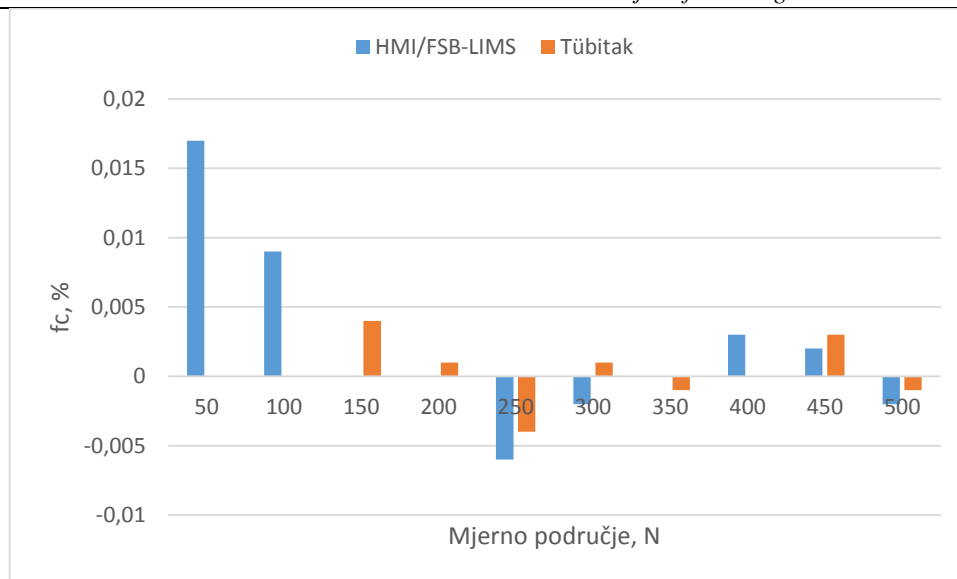
Također možemo ustvrditi kako HMI/FSB-LIMS za dinamometar Z30A (slika 30) i U1 (slika 31) očito pokazuje bolje vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom gotovo duž cijelog mjernog područja. I u oba slučaja je vrijednost pogreške znatno ispod dozvoljene vrijednosti za klasu 00 ali su također ravnomjerno raspoređene po cijelom mjernom području.

Na slici 32 prikazana je relativna pogreška interpolacije  $f_c$  po mjernom području dinamometra Z30A uspoređivanih laboratorija.



**Slika 32. Vrijednosti relativne pogreške interpolacije uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A**

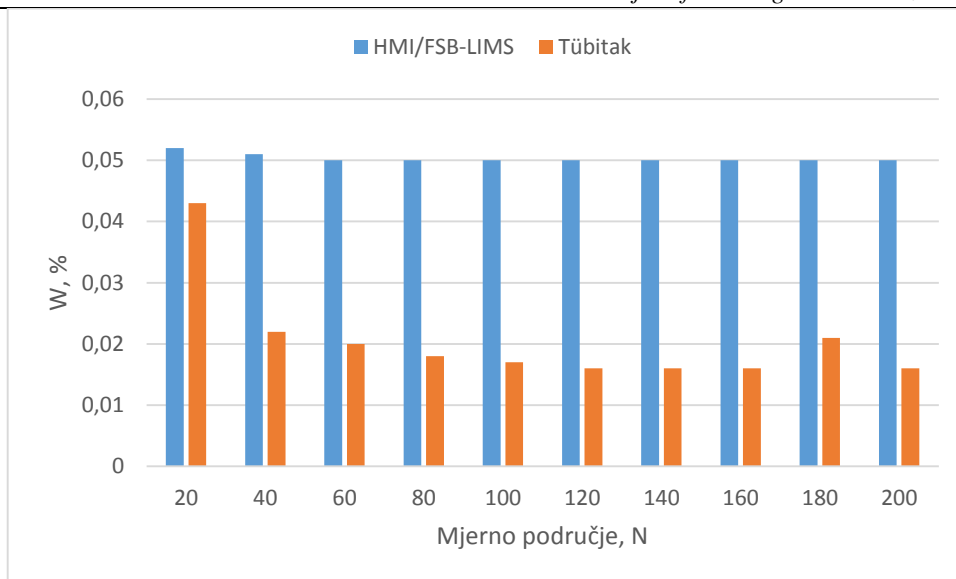
Na slici 33 Slika 33 prikazana je relativna pogreška interpolacije  $f_c$  po mjernom području dinamometra U1 uspoređivanih laboratorija.



**Slika 33. Vrijednosti relativne pogreške interpolacije uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1**

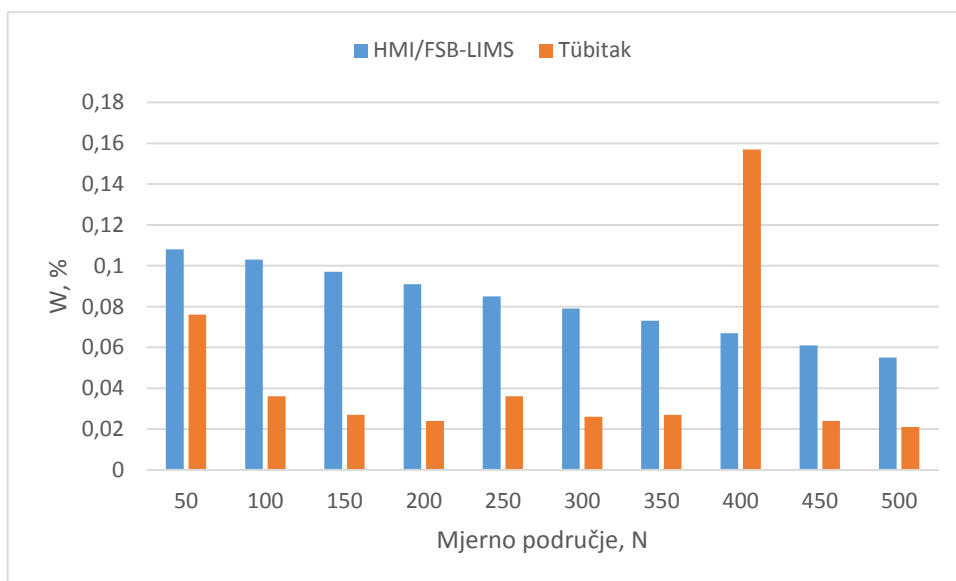
S obzirom da dozvoljena pogreška interpolacije za klasu 00 mora biti unutar granica  $\pm 0,025\%$  vidljivo je da kod oba prijenosna etalona možemo veoma dobro interpolirati rezultate umjeravanja te da su vrijednosti pogreške znatno niže od dozvoljenog odstupanja. Možemo primijetiti kako HMI/FSB-LIMS za dinamometar Z30A (Slika 32) posjeduje lošiju relativnu pogrešku  $f_c$  u dvije mjerne točke (40 i 100 N), istovjetnu u mjernim točkama 60 i 120 N, te bolju u ostalih šest mjernih točaka. No, za dinamometar U1 (Slika 33), HMI/FSB-LIMS posjeduje lošiju relativnu pogrešku u šest mjernih točaka, te bolju u četiri mjerne točke. Stoga bi se moglo zaključiti kako HMI/FSB-LIMS sa novim sustavom razvijenim za potrebe ovog diplomskog rada, posjeduje mogućnost preciznog mjerenja sile s kojim je u stanju konkurirati međunarodno certificiranim laboratorijima.

Na slici 34 Slika 34 prikazana je proširena mjerna nesigurnost ( $W$ ) po mjernom području dinamometra Z30A uspoređivanih laboratorija.



**Slika 34. Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti uspoređivanih laboratorija za dinamometar Z30A**

Na slici 35 prikazana je proširena mjerna nesigurnost  $W$  po mjernom području dinamometra U1 uspoređivanih laboratorija.



**Slika 35. Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti uspoređivanih laboratorija za dinamometar U1**

Možemo primijetiti kako HMI/FSB-LIMS za dinamometre Z30A i U1 ima lošiju proširenu mjernu nesigurnost  $W$  duž čitavog mjernog područja, izuzev mjernog područja 400 N kod dinamometra U1. Ova anomalija kod prijenosnog etalona U1 na mjernoj točki 400 N je proizašla iz nešto povećanog histereznog mjerenja. Također valja primijetiti kako HMI/FSB-LIMS sustav sa dinamometrom Z30A posjeduje gotovo identičnu proširenu mjernu sigurnost tokom čitavoga mjernoga područja, dok je kod dinamometra U1 proširena mjerna nesigurnost

na početku povećana, te što se više približavamo nazivnoj vrijednosti sile ona pada. U pravilu prijenosni etaloni sile najbolje rezultate imaju od 40 % do 100 % nazivne sile. Ovdje treba naglasiti da je ulazna procijenjena mjerna sposobnost HMI/FSB-LIMS-ovog referentnog etalona sile bila 0,05 %, što je također sastavnica proširene mjerne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile, pa je i očekivano da će HMI/FSB-LIMS imati lošije vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti. Ovakvo ponašanje HMI/FSB-LIMS sustava je dobar pokazatelj kvalitete, te bi se vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti mogle dovesti na još povoljniju razinu kroz daljnje istraživanje i razvoj sustava, a što će se utvrditi kada sustav bude funkcionalan za cjelokupno mjerno područje od 10 N do 1000 N.

## 7. ZAKLJUČAK

U sklopu rada, konstruiran je prihvat za umjeravanje prijenosnih etalona sile na referentnom etalonu sile nazivne vrijednosti 1000 N sa sustavom direktnog opterećivanja pomoću utega.

Dva idejna rješenja za prihvat utega (okvir nosača utega sile s dva i tri kraka) proračunati su pomoću programskog paketa Ansys, te je proračun pokazao sljedeće:

- vrijednosti pomaka gornje i donje ploče su manje odnosno bolje kod modela nosača sa 3 kraka,
- model s tri kraka je mnogo stabilniji, odnosno smanjena je mogućnost zanošenja tokom postupka mjerenja, a samim time manji utjecaj na rezultate umjeravanja,
- stoga je kao optimalno rješenje za izradu nosača prihvata utega izabran model s tri kraka.

Rekonstrukcijom referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N i primjenom trokrakog ovjesnog sustava postignuti su sljedeći rezultati:

- niske vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije  $b'$  i relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom  $b$ ,
- niska relativna pogreška uslijed interpolacije  $f_c$  pri umjeravanju prijenosnih etalona sile,
- određivanjem lokalnog ubrzanja zemljine sile teže na mjestu instalacije referentnog etalona sile ( $g = 9,80663337 \pm 1,82 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ) i njegova primjena pri određivanju potrebne mase utega kako bismo postigli određenu silu mogu se postići bolje mjerne sposobnosti etalonskog mjerila,
- usporedna mjerenja s drugim nacionalnim laboratorijem su pokazala kako je postignuta visoka razina mjerne sposobnosti rekonstruiranog referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N te da je za očekivati da će ista biti niža od 0,01%.

Provedenim ispitivanjima u sklopu ovog rada potvrđena je pretpostavka da laboratorij HMI/FSB-LIMS, nositelj nacionalnog etalona sile u Hrvatskoj, uz daljnje istraživanje i razvoj ima tehničke i mjeriteljske predispozicije za proširenje svoje akreditacije u mjernom području od 20 – 1000 N.



---

**LITERATURA**

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] Muftić, O.: Mehanika I (Statika), Tehnička knjiga, Zagreb, 1983.
- [3] Alar, Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [4] Fabijanić, T. A., Alar, Ž., Sakoman, M.: Mjeriteljske sile i njeno značenje, Kompetentnost laboratorija CROLAB, 2016.
- [5] Mahović, S.: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [6] [www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-121.html](http://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-121.html)
- [7] [www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/?action=view&site\\_id=106&id=2145EAL-R2:](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=106&id=2145EAL-R2)
- [8] HRN EN ISO 376:2012 – Metallic materials - Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing
- [9] Alar, Ž.: Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, doktorski rad, Zagreb, 2008.
- [10] <http://www.ume.tubitak.gov.tr/en/laboratuvarlarimiz/force-laboratories>

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija